

日 本 国 特 許 庁

JAPAN PATENT OFFICE

50212-512  
MIYAMOTO et al.

June 27, 2003.

McDermott, Will & Emery

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office

出 願 年 月 日

Date of Application:

2003年 2月28日

出 願 番 号

Application Number:

特願2003-054712

[ST.10/C]:

[JP2003-054712]

出 願 人

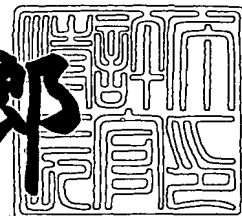
Applicant(s):

住友電気工業株式会社

2003年 6月 3日

特 許 庁 長 官  
Commissioner,  
Japan Patent Office

太田信一郎



出証番号 出証特2003-3043189

【書類名】 特許願

【整理番号】 103Y0033

【提出日】 平成15年 2月28日

【あて先】 特許庁長官殿

【国際特許分類】 H04J 14/02

【発明者】

    【住所又は居所】 神奈川県横浜市栄区田谷町 1 番地 住友電気工業株式会  
社横浜製作所内

    【氏名】 宮本 敏行

【発明者】

    【住所又は居所】 神奈川県横浜市栄区田谷町 1 番地 住友電気工業株式会  
社横浜製作所内

    【氏名】 重松 昌行

【発明者】

    【住所又は居所】 神奈川県横浜市栄区田谷町 1 番地 住友電気工業株式会  
社横浜製作所内

    【氏名】 西村 正幸

【特許出願人】

    【識別番号】 000002130

    【氏名又は名称】 住友電気工業株式会社

【代理人】

    【識別番号】 100088155

    【弁理士】

    【氏名又は名称】 長谷川 芳樹

【選任した代理人】

    【識別番号】 100089978

    【弁理士】

    【氏名又は名称】 塩田 辰也

【選任した代理人】

【識別番号】 100092657

【弁理士】

【氏名又は名称】 寺崎 史朗

【選任した代理人】

【識別番号】 100110582

【弁理士】

【氏名又は名称】 柴田 昌聰

【先の出願に基づく優先権主張】

【出願番号】 特願2002-190967

【出願日】 平成14年 6月28日

【手数料の表示】

【予納台帳番号】 014708

【納付金額】 21,000円

【その他】

国等の委託研究の成果に係る特許出願（平成14年度通信・放送機構「トータル光通信技術の研究開発」委託研究，産業活力再生特別措置法第30条の適用を受けるもの）

【提出物件の目録】

【物件名】 明細書 1

【物件名】 図面 1

【物件名】 要約書 1

【包括委任状番号】 0106993

【ブルーフの要否】 要

【書類名】 明細書

【発明の名称】 光伝送システム

【特許請求の範囲】

【請求項 1】 光周波数間隔が 4 0 0 G H z 以上 1 2 . 5 T H z 以下である複数信号チャネルが多重化された信号光を出力する送信器と、

前記信号光を伝送する光ファイバ伝送路と、

ラマン増幅用光ファイバとして前記光ファイバ伝送路の少なくとも一部を含むとともに、ラマン増幅用励起光を供給することにより前記信号光をラマン増幅するラマン増幅手段を備えた光伝送システム。

【請求項 2】 前記信号光における信号チャネル間隔は、1 0 n m 以上であることを特徴とする請求項 1 記載の光伝送システム。

【請求項 3】 前記ラマン増幅手段は、集中定数型ラマン増幅器であることを特徴とする請求項 1 記載の光伝送システム。

【請求項 4】 前記集中定数型ラマン増幅器は、前記光ファイバ伝送路のうち該集中型ラマン増幅器の外部に位置する伝送路区間をラマン増幅用光ファイバとして利用すべく、該外部伝送路区間に余剰のラマン増幅用励起光を導くための構造を有することを特徴とする請求項 3 記載の光伝送システム。

【請求項 5】 前記ラマン増幅手段は、前記光ファイバ伝送路のうち前記信号光の送信端及び受信端の少なくともいずれか一方に設けられたことを特徴とする請求項 1 記載の光伝送システム。

【請求項 6】 少なくとも前記光ファイバ伝送路のうちラマン増幅用光ファイバとして機能する伝送路区間は、前記信号光の複数信号チャネルが存在する波長帯域において負の波長分散を有する光ファイバを含むことを特徴とする請求項 1 記載の光伝送システム。

【請求項 7】 少なくとも前記光ファイバ伝送路のうちラマン増幅用光ファイバとして機能する伝送路区間は、波長 1 . 3 9  $\mu$  m 付近における O H 基に起因した損失ピークが 0 . 3 3 d B / k m 以下である光ファイバを含むことを特徴とする請求項 1 記載の光伝送システム。

【請求項 8】 前記信号光に含まれる複数信号チャネルうちの隣接する信号

チャンネル間に前記ラマン増幅用の励起チャンネルが存在することを特徴とする請求項 1 記載の光伝送システム。

【請求項 9】 前記ラマン増幅手段は、前記信号光に含まれる複数信号チャンネルのうち前記光ファイバ伝送路における伝送損失が第 1 閾値以上である波長範囲内の信号チャンネルをラマン増幅することを特徴とする請求項 1 記載の光伝送システム。

【請求項 10】 前記信号光に含まれる複数信号チャンネルのうち前記光ファイバ伝送路における累積波長分散が第 2 閾値以上である波長範囲内の信号チャンネルの分散を補償する分散補償手段をさらに備えることを特徴とする請求項 1 記載の光伝送システム。

【請求項 11】 光周波数間隔が 4 0 0 G H z 以上 1 2 . 5 T H z 以下である複数信号チャンネルが多重化された信号光を出力する送信器と、

前記信号光を伝送する光ファイバ伝送路と、

ラマン増幅用光ファイバとして前記光ファイバ伝送路の一部を含むとともに、該光ファイバ伝送路の一部に 1 以上の励起チャンネルが多重化されたラマン増幅用励起光を供給する励起光光源を含み、該ラマン増幅用励起光の供給により前記信号光をラマン増幅するラマン増幅手段とを備え、

前記励起光に含まれる各励起チャンネルの光周波数は、前記信号光に含まれる各信号チャンネルの光周波数とは異なる光周波数にラマン増幅ピークが位置するように設定されている光伝送システム。

【請求項 12】 前記励起チャンネルの光周波数は、前記各信号チャンネルの光周波数から 6 2 . 4 G H z 以上離れた光周波数にラマン増幅ピークが位置するように設定されていることを特徴とする請求項 11 記載の光伝送システム。

【請求項 13】 前記励起チャンネルの光周波数は、前記各信号チャンネルの光周波数から 1 2 4 8 G H z 以上離れない光周波数にラマン増幅ピークが位置するように設定されていることを特徴とする請求項 12 記載の光伝送システム。

【請求項 14】 隣り合う前記励起チャンネルの光周波数間隔は、4 6 8 0 G H z 以上であることを特徴とする請求項 11 記載の光伝送システム。

【請求項 15】 前記励起光に含まれる励起チャンネルのうち互いに隣接した

励起チャネルの光周波数は、前記信号光に含まれる各信号チャネルの光周波数から 62.4 GHz 以上離れる一方 2496 GHz 以上離れない光周波数にラマン増幅ピークが位置するように設定されていることを特徴とする請求項 14 記載の光伝送システム。

【請求項 16】 前記信号光の光周波数帯域が 12.48 THz 以下であり、前記励起光の励起チャネル数を  $m$ 、前記信号光の信号チャネル数を  $n$  とするとき、これら励起チャネル数と信号チャネル数とは、

$$m \leq n / 2$$

なる関係を満たすことを特徴とする請求項 11 記載の光伝送システム。

【請求項 17】 前記信号光の光周波数帯域が 12.48 THz 以下であり、前記励起光の励起チャネル数を  $m$ 、前記信号光の信号チャネル数を  $n$  とするとき、これら励起チャネル数と信号チャネル数とは、

$$m \leq (n + 4) / 2$$

なる関係を満たすことを特徴とする請求項 11 記載の光伝送システム。

【請求項 18】 前記ラマン増幅手段の利得スペクトルは、前記励起光に含まれる励起チャネルそれぞれに由来した互いに異なる光周波数のラマン増幅ピークを有し、

前記励起光に含まれる各励起チャネルの光周波数は、該励起チャネルそれぞれに由来するラマン増幅ピークが前記信号光に含まれる各信号チャネルの光周波数とは異なる光周波数になるよう設定されていることを特徴とする請求項 11 記載の光伝送システム。

【請求項 19】 前記ラマン増幅手段の利得スペクトルは、前記励起光に含まれる励起チャネルそれぞれに由来した第 1 光周波数間隔で存在するラマン増幅ピークを有し、

前記信号光に含まれる各信号チャネルの光周波数は、前記励起チャネルそれぞれに由来したラマン増幅ピークと異なり、かつ第 2 光周波数間隔になるよう設定されていることを特徴とする請求項 11 記載の光伝送システム。

【発明の詳細な説明】

【0001】

## 【発明の属する技術分野】

この発明は、互いに異なる光周波数の複数信号チャンネルが多重化された信号光を伝送する光伝送システムに関するものである。

## 【0002】

## 【従来の技術】

波長分割多重 (WDM: Wavelength Division Multiplexing) 光伝送システムは、互いに異なる光周波数の複数信号チャンネルが多重化された信号光 (WDM信号光) を光ファイバ伝送路を介して伝送する光システムであり、大容量の情報を高速に送受信することができる。通信需要が旺盛な幹線系の光伝送システムでは、複数信号チャンネルの光周波数間隔を狭くすることで多重度を大きくして、これにより更なる大容量化を図ることが検討されている。このような多重度が大きい WDMは、DWDM (Dense WDM) と呼ばれる。

## 【0003】

一方、それほど通信需要が大きい光伝送システムでは、複数信号チャンネルの光周波数間隔を広くすることで多重度を小さくし、これによりシステムコストの低減が図られている。このような多重度が小さい WDMは、CWDM (Coarse WDM) と呼ばれる。CWDM光伝送システムでは、信号光の信号チャンネル数低減に伴って光部品 (例えば、信号光源、受光素子等) の数を削減し、また、光周波数間隔が大きいことに起因した波長精度要求値が低い安価な光部品 (例えば、光合波器、光分波器等) を使用することで、システムコストの低減を図ることができる。

## 【0004】

## 【発明が解決しようとする課題】

発明者らは、従来の光通信システムを検討した結果、以下のような課題を発見した。すなわち、従来の CWDM光伝送システムでは、信号チャンネルの光周波数間隔が大きいことから、各信号チャンネルを含む信号波長帯域の幅が広くなり、例えば、この帯域幅が 100 nm程度になる場合もある。帯域幅が 100 nm程度もあると、その信号波長帯域内の短波長側と長波長側とでは、光ファイバ伝送路の光学特性 (例えば、伝送損失、波長分散等) が大きく異なる。このことから、

従来のC WDM光伝送システムは、信号波長帯域内に含まれる各信号チャネルの伝送品質を均一に維持することは困難である。

## 【0005】

この発明は、上述のような課題を解決するためになされたものであり、複数信号チャネルそれぞれについて高品質伝送を保証し得る構造を備えた光伝送システムを提供することを目的としている。

## 【0006】

## 【課題を解決するための手段】

この発明に係る光伝送システムは、複数信号チャネルが多重化された信号光（WDM信号）を光ファイバ伝送路を介して伝送するC WDM光伝送システムであって、該信号光の各信号チャネルの高い伝送品質を保証するための構造を備える。すなわち、この発明に係る光伝送システムは、光周波数間隔が400GHz以上12.5THz以下である複数信号チャネルが多重化された信号光を出力する送信器と、該信号光を伝送する光ファイバ伝送路と、ラマン増幅用励起光の供給により該信号光をラマン増幅するラマン増幅手段を備える。なお、このラマン増幅手段は、光ファイバ伝送路の一部をラマン増幅用光ファイバとして含む。また、このように、信号光に含まれる信号チャネルの波長間隔は10nm以上であるのが好ましい。

## 【0007】

この発明に係る光伝送システムにおいて、上記ラマン増幅手段は上記光ファイバ伝送路の一部を構成するラマン増幅用光ファイバを含む集中定数型増幅器であってもよい。さらにこの場合、集中定数型ラマン増幅器は、該集中定数型ラマン増幅器の外部に位置する光ファイバ伝送路の伝送路区間もラマン増幅用光ファイバとして利用すべく（この場合、ラマン増幅手段は分布定数型ラマン増幅器としても機能する）、該外部伝送路区間に余剰のラマン増幅用励起光を導くための構造を備えるのが好ましい。また、上記ラマン増幅手段は、上記光ファイバ伝送路のうち上記信号光の送信端及び受信端の少なくとも一方に設けられるのが好ましい。これら何れの場合にも、高利得のラマン増幅が可能になる。

## 【0008】



この発明に係る光伝送システムにおいて、上記光ファイバ伝送路のうち少なくともラマン増幅用光ファイバとして機能する伝送路区間は、上記信号光を含む波長帯域において負の波長分散を有する光ファイバを含むのが好ましい。一般に光ファイバ伝送路は正の波長分散を有するので、上記ラマン増幅手段に含まれる光ファイバによりその波長分散が補償され、高品質の信号伝送が可能になるからである。

## 【0009】

一方、この発明に係る光伝送システムにおいて、上記光ファイバ伝送路のうち少なくともラマン増幅用光ファイバとして機能する伝送路区間は、波長 $1.39\mu\text{m}$ 付近におけるOH基に起因した損失ピークが $0.33\text{dB/km}$ 以下である光ファイバを含んでもよい。この場合、波長 $1.39\mu\text{m}$ 付近の励起光を高効率に供給することができるので、励起効率を改善することができ、また、利得スペクトルも改善することができる。

## 【0010】

この発明に係る光伝送システムにおいて、励起チャネルの波長は、上記信号光に含まれる信号チャネルのうち互いに隣接する信号チャネル間に位置するのが好ましい。このように信号チャネルと励起チャネルとを配置することで、信号波長帯域内の長波長側でも信号光を高利得でラマン増幅することができる。

## 【0011】

さらにこの発明に係る光伝送システムにおいて、上記ラマン増幅手段は、上記信号光に含まれる信号チャネルのうち上記光ファイバ伝送路における伝送損失が第1閾値以上である波長範囲内の信号チャネルをラマン増幅するのが好ましい。また、上記ラマン増幅手段は、上記信号光に含まれる信号チャネルのうち上記光ファイバ伝送路における累積波長分散が第2閾値以上である波長範囲内の信号チャネルの波長分散を補償する分散補償手段をさらに備えるのが好ましい。これら何れの場合にも、信号波長帯域内の必要な波長範囲においてラマン増幅あるいは分散補償することができるので、各信号チャネルにおいて高品質の信号伝送が可能になる。

## 【0012】

なお、信号チャネル間の利得バラツキを抑えながらより広い波長帯域での光増幅を可能にするには複数の励起光光源（LD）を利用する技術が、例えば特開 2 0 0 0 - 9 8 4 3 3 号公報に開示されている。しかしながら、従来の CWDM 光伝送システムでは、励起光のチャネル間隔が 6 nm 以上 3 5 nm 以下であるため、励起 LD の数を少なく保ったままさらに利得平坦度を高めることは困難であった。

## 【 0 0 1 3 】

この発明に係る光伝送システムは、CWDM 光伝送システムとして、光源数を少なく維持した状態でより広い波長帯域におけるラマン増幅を可能にする。

## 【 0 0 1 4 】

具体的に、この発明に係る光伝送システムは、所定の多重化信号を出力する送信器と、光ファイバ伝送路と、該信号光をラマン増幅するラマン増幅手段を備える。上記送信器は、光周波数間隔が 4 0 0 GHz 以上 1 2 . 5 THz 以下である複数信号チャネルが多重化された信号光を出力する。上記光ファイバ伝送路は、送信器と受信器との間に敷設され、上記信号光信号光を伝送する。上記ラマン増幅器は、ラマン増幅用光ファイバとして上記光ファイバ伝送路の一部を含むとともに、該光ファイバ伝送路の一部に 1 以上の励起チャネルが多重化されたラマン増幅用励起光を供給する励起光光源を含む。

## 【 0 0 1 5 】

特に、この発明に係る光伝送システムにおいて、各励起チャネルの光周波数は、各信号チャネルの光周波数とは異なる光周波数にラマン増幅ピークが位置するように設定されている。すなわち、信号チャネルの光周波数は、励起チャネルの光周波数から 1 3 . 2 THz 低い光周波数と異なっている。具体的には、上記励起光に含まれる各励起チャネルの光周波数は、上記信号光に含まれる各信号チャネルの光周波数から 6 2 . 4 GHz（5 nm）以上離れた光周波数にラマン増幅ピークが位置するように設定されていることが好ましい。一方、上記励起光に含まれる各励起チャネルの光周波数は、上記信号光に含まれる各信号チャネルの光周波数から 1 2 4 8 GHz（1 0 nm）以上離れない光周波数にラマン増幅ピークが位置するように設定されているのが好ましい。これにより、CWDM 光伝送システ

ムにおいて、励起光光源の数を少なく保ったままより広い波長帯域において高い利得平坦度が得られる。

## 【 0 0 1 6 】

この発明に係る光伝送システムにおいて、隣り合う 2 以上の励起チャネルの光周波数間隔は、4 6 8 0 G H z ( 3 7 5 n m ) 以上であるのが好ましい。また、上記励起光に含まれる励起チャネルのうち互いに隣接した励起チャネルの光周波数は、上記信号光に含まれる各信号チャネルの光周波数から 6 2 . 4 G H z 以上離れる一方 2 4 9 6 G H z ( 2 0 n m ) 以上離れない光周波数にラマン増幅ピークが位置するように設定されてもよい。

## 【 0 0 1 7 】

この発明に係る光伝送システムにおいて、上記信号光の光周波数帯域が 1 2 . 4 8 T H z ( 1 0 0 n m ) 以下であり、励起チャネル数は使用される信号チャネル数によって決定される。すなわち、上記励起光の励起チャネル数を  $m$ 、上記信号光の信号チャネル数を  $n$  とするとき、これら励起チャネル数と信号チャネル数とは、 $m \leq n / 2$ 、さらには  $m \leq (n + 4) / 2$  なる関係を満たす。

## 【 0 0 1 8 】

なお、この発明に係る光伝送システムにおいて、複数の励起チャネルを利用する場合、上記ラマン増幅手段の利得スペクトルは、励起光に含まれる励起チャネルそれぞれに由来した互いに異なる光周波数のラマン増幅ピークを有する。この場合、励起光に含まれる各励起チャネルの光周波数は、該励起チャネルそれぞれに由来するラマン増幅ピークが信号光に含まれる各信号チャネルの光周波数とは異なる光周波数になるよう設定される。換言すれば、上記ラマン増幅手段の利得スペクトルは、励起光に含まれる励起チャネルそれぞれに由来した第 1 光周波数間隔の存在するラマン増幅ピークを有し、信号光に含まれる各信号チャネルの光周波数は、励起チャネルそれぞれに由来したラマン増幅ピークと異なり、かつ第 2 光周波数間隔になるよう設定される。

## 【 0 0 1 9 】

## 【発明の実施の形態】

以下、この発明に係る光伝送システムの各実施形態を図 1 ～図 2 0 を用いて詳

細に説明する。なお、図面の説明において同一の要素には同一の符号を付し、重複する説明を省略する。

#### 【0020】

##### （第1実施形態）

先ず、この発明に係る光伝送システムの第1実施形態について説明する。図1は、この発明に係る光伝送システムにおける第1実施形態の構成を示す図である。この図1に示された光伝送システム1は、CWDM光伝送システムであって、光送信器110、光ファイバ伝送路120及び集中定数型ラマン増幅器（LRA）130を少なくとも備える。

#### 【0021】

光送信器110は、光周波数間隔が400GHz以上12.5THz以下である複数信号チャンネルが多重化された信号光（WDM信号）を出力する。この光送信器110から出力される多重化信号光の波長間隔（チャンネル間隔）は10nm以上であるのが好ましい。光送信器110に含まれる、各信号チャンネルを出力する光源としては、例えば、分布帰還型レーザ光源、ファブリ・ペロー型の半導体レーザ光源（FP-LD）、及び、該FP-LDと光ファイバグレーティングとを組み合わせることにより出力波長の安定化を図るファイバグレーティングレーザ光源等が適用可能である。信号光の変調に際しては、これらの光源が直接変調されてもよいし、外部変調器により外部変調されてもよい。また、これらの光源は温度調整されなくてもよい。CWDM光伝送では、各信号チャンネルの波長変動の許容範囲が広いので、直接変調あるいは無温調とすることにより信号チャンネル波長が多少変動しても構わない。

#### 【0022】

光ファイバ伝送路120は、光送信器110から出力された多重化信号光をラマン増幅器130へ向けて伝送する。この光ファイバ伝送路120は、波長1.3 $\mu$ m付近に零分散波長を有する標準的なシングルモード光ファイバ（SMF: Single-Mode Optical Fiber）、波長1.3 $\mu$ mより長波長側に零分散波長を有し波長1.55 $\mu$ mにおいて小さい正の波長分散を有する非零分散シフト光ファイバ（NZDSF: Non-Zero Dispersion Shifted Optical Fiber）、波長1.

55  $\mu$ m 付近に零分散波長を有する分散シフト光ファイバ (DSF: Dispersion Shifted Optical Fiber)、コア領域が実質的に純石英ガラスであってクラッド領域に F 元素が添加されている純石英コア光ファイバ、及び、実効断面積が通常のものより拡大されているシングルモード光ファイバ等、いずれの光ファイバであってもよい。また、光ファイバ伝送路 120 は、これら光ファイバのうちのいずれか 2 種以上の光ファイバを接続することで構成されてもよいし、これら光ファイバのうちいずれか一種以上の光ファイバと分散補償光ファイバ (DCF: Dispersion Compensating Optical Fiber) とを接続することで構成されてもよい。

## 【0023】

ラマン増幅器 130 は、光ファイバ伝送路 120 から伝送されて到達した多重化信号光を入力し、この多重化信号光をラマン増幅する。ラマン増幅器 130 は、多重化信号光の送信端及び受信端の少なくとも一方に設けられるのが好ましい。ラマン増幅器 130 は、信号光入力端から信号光出力端へ向かって順に、光アイソレータ 131、光カップラ 133、ラマン増幅用光ファイバ 137 (光ファイバ伝送路 120 とともに光送信器と光受信器との間に敷設された光ファイバ伝送路の一部を構成する)、光カップラ 134、及び光アイソレータ 132 を備える。さらにラマン増幅器 130 は、光カップラ 133 に接続された励起光源部 135、及び、光カップラ 134 に接続された励起光源部 136 を備える。

## 【0024】

光アイソレータ 131、132 それぞれは、信号光入力端から信号光出力端へ向かう順方向に光を通過させるが、逆方向には光を通過させない。励起光源部 135、136 それぞれは、光ファイバ 137 において信号光をラマン増幅するための励起光を出力する。光カップラ 133 は、励起光源部 135 から到達した励起光を光ファイバ 137 へ順方向に出力するとともに、光アイソレータ 131 から到達した信号光をも光ファイバ 137 へ出力する。光カップラ 134 は、励起光源部 136 から到達した励起光を光ファイバ 137 へ逆方向に出力するとともに、光ファイバ 137 から到達した信号光を光アイソレータ 132 へ出力する。

## 【0025】

励起光源部 135、136 それぞれは、例えば、ファブリ・ペロー型の半導体レーザ光源 (FP-LD)、この FP-LD と光ファイバグレーティングとを組み合わせることにより出力波長の安定化を図るファイバグレーティングレーザ光源、分布帰還型レーザ光源、及び、ラマンレーザ光源等が適用可能である。また、励起光源部 135、136 それぞれは、それに含まれる光源が偏波依存性を有する場合に、該光源から出力された励起光を偏波合成する偏波合成器を含むのが好ましく、また、光源から出力された励起光を無偏光化するデポラライザを含んでもよい。

## 【0026】

ラマン増幅用光ファイバ 137 は、ラマン増幅用励起光が供給されることにより多重化信号光をラマン増幅する。この光ファイバ 137 が石英系光ファイバである場合、励起光周波数は信号光周波数より 13.2 THz 程度小さく、励起光波長は信号光波長より 100 nm 程度短い。また、一般に石英系光ファイバは波長 1.39  $\mu\text{m}$  付近において OH 基に起因した損失ピークが 0.40 dB/km 程度あるが、この実施形態に適用される光ファイバ 137 は、波長 1.39  $\mu\text{m}$  付近において OH 基に起因した損失ピークが 0.33 dB/km 以下であるのが好ましい。この損失ピークが小さいことにより、波長 1.39  $\mu\text{m}$  付近のラマン増幅用の励起光は、光ファイバ 137 を低損失で伝搬するので、優れたラマン増幅利得が得られる。

## 【0027】

励起光の入力パワーを  $P_p$  とし、ラマン増幅用光ファイバの長さを  $L$  とし、信号光波長での光ファイバの伝送損失を  $\alpha_s$  とし、励起光波長での光ファイバの伝送損失を  $\alpha_p$  とし、光ファイバのラマン利得係数を  $g_R$  とし、光ファイバの実効断面積を  $A_{\text{eff}}$  とすると、この光ファイバにおけるラマン増幅により得られるオンオフ利得  $G_{\text{on-off}}$  及び Net 利得  $G_{\text{net}}$  それぞれは、

$$G_{\text{on-off}} = \exp(L_{\text{eff}} P_p g_R / A_{\text{eff}}) \quad \dots (1a)$$

$$G_{\text{net}} = \exp(L_{\text{eff}} P_p g_R / A_{\text{eff}} - \alpha_s L) \quad \dots (1b)$$

ただし、

$$L_{\text{eff}} = (1 - \exp(-\alpha_p L)) / \alpha_p \quad \dots (1c)$$

なる式で表される。 $L_{\text{eff}}$ は光ファイバの実効長を表す。

#### 【0028】

この式から、損失 $\alpha_p$ を小さくすることで、利得を大きくすることができることが分かる。波長 $1.39\mu\text{m}$ 付近の波長の励起光を用いる場合、OH基に起因した損失ピークを低減することが効果的である。波長 $1.39\mu\text{m}$ 付近におけるOH基に起因した損失ピークを通常の $0.40\text{dB/km}$ から $0.33\text{dB/km}$ 以下まで低減することにより、光ファイバの実効長 $L_{\text{eff}}$ を $2.50\text{km}$ から $3.03\text{km}$ まで長くすることができるので、励起効率が2割程度向上する。

#### 【0029】

また、ラマン増幅用光ファイバ137は、光ファイバ伝送路120の波長分散を補償するのが好ましい。一般に光ファイバ伝送路として用いられる光ファイバは、標準的なシングルモード光ファイバ又は分散シフト光ファイバであって、信号波長帯域内の波長 $1.55\mu\text{m}$ において正の波長分散を有する。また、一般に信号光源として用いられるレーザダイオードより直接変調されて出力される信号光は、正の波長分散を有する。そこで、ラマン増幅用光ファイバ137は、波長 $1.55\mu\text{m}$ において負の波長分散を有するのが好ましい。これにより、累積波長分散に起因した信号光の波形劣化が低減され、高品質の信号伝送が可能になる。なお、光ファイバ137とは別に、分散補償器を設けてもよい。

#### 【0030】

図2は、信号光及び励起光それぞれのチャネル配置を説明するための図である。図2(a)に示されたチャネル配置では、全信号チャネル（この図では6波長）を含む信号波長帯域の幅が $100\text{nm}$ 以下であり、該信号波長帯域より短波長側に全ての励起チャネルが存在する。励起チャネルそれぞれは $35\text{nm}$ 以上離れているのが好ましい。図2(b)に示されたチャネル配置では、全信号チャネルを含む信号波長帯域より短波長側に励起チャネルが存在するだけでなく、その信号波長帯域であって隣接信号チャネル間にも励起チャネルが存在する。このように隣接信号チャネル間に励起チャネルを配置することで、広帯域に亘って多重化信号光を高効率にラマン増幅することができるとともに、信号波長帯域内における利得スペクトルを所望の形状にすることができる。図2(c)に示されたチャ

ネル配置では、全信号チャネルを含む信号波長帯域の幅が100nm以上である場合であって、その信号波長帯域より短波長側に全ての励起チャネルが存在する。このような場合でも、一般に信号波長帯域内において伝送損失が小さい高波長側でラマン増幅しなくても（あるいは利得が小さくても）よいので、高品質のCWDM光伝送が可能である。なお、図2において、各励起チャネルは複数の縦モードを含んでいるが、線幅の狭いレーザ光であってもよい。

## 【0031】

この光伝送システム1では、光周波数間隔が400GHz以上12.5THz以下である複数信号チャネルが多重化された信号光は、光送信器110から出力され、光ファイバ伝送路120を伝搬し、そして、ラマン増幅器130に到達する。ラマン増幅器130では、励起光源部135、136から出力された励起光が光カップラ133、133を經由して光ファイバ137に供給される。ラマン増幅器130に到達した多重化信号光は、光アイソレータ131及び光カップラ133を通過して光ファイバ137に到達する。そして、この光ファイバ137において多重化信号光がラマン増幅される。ラマン増幅された信号光は、光カップラ134及び光アイソレータ132を通過して、ラマン増幅器130の外部に出力される。ラマン増幅器130における利得スペクトルの帯域幅や形状は比較的自由に設計することができるので、信号波長帯域が広帯域であっても、多重化信号光の信号チャネルそれぞれを高品質でCWDM光伝送することができる。

## 【0032】

## (第2実施形態)

次に、この発明に係る光伝送システムの第2実施形態について説明する。図3は、この発明に係る光伝送システムにおける第2実施形態の構成を示す図である。この図3に示された光伝送システム2は、CWDM光伝送システムであって、光送信器110、光ファイバ伝送路120及び集中定数型ラマン増幅器230を備える。第2実施形態に係る光伝送システム2は、上述の第1実施形態に係る光伝送システム1と比較すると、ラマン増幅器130に替えてラマン増幅器230を備えている点で相違する。

## 【0033】



この第2実施形態におけるラマン増幅器230は、信号光入力端から信号光出力端へ向かって順に、ラマン増幅用光ファイバ137（光ファイバ伝送路とともに光送信器と光受信器との間に敷設された光ファイバ伝送路の一部を構成する）、光カップラ134及び光アイソレータ132を備える。さらに、ラマン増幅器230は、光カップラ134に接続された励起光源部136を備える。このラマン増幅器230は、第1実施形態におけるラマン増幅器130から、光アイソレータ131、光カップラ133及び励起光源部135を取り除いた構成に相当する。

## 【0034】

この光伝送システム2において、ラマン増幅器230は、励起光源部136から出力された励起光を、光カップラ4を通過して光ファイバ137へ供給するだけでなく、余剰の励起光を当該ラマン増幅器230から外部に位置する光ファイバ伝送路120へ供給するための構造（図3中の、光ファイバ伝送路120光ファイバ137との由着接続点Aに相当）を有する。すなわち、当該光伝送システム2は、ラマン増幅手段として、集中定数型ラマン増幅器230の他、光ファイバ伝送路120、光カップラ134及び励起光源部136により構成された分布定数型ラマン増幅器（DRA）を備える。したがって、光送信器110から出力された多重化信号光は、光ファイバ伝送路120を伝搬する間にもラマン増幅され、また、ラマン増幅器230によってもラマン増幅される。

## 【0035】

なお、この第2実施形態では、光ファイバ伝送路120にも励起光が供給されるので、光ファイバ137だけでなく光ファイバ伝送路120も、波長 $1.39\mu\text{m}$ 付近においてOH基に起因した損失ピークが $0.33\text{dB/km}$ 以下であるのが好ましい。

## 【0036】

## （第3実施形態）

次に、この発明に係る光伝送システムの第3実施形態について説明する。図4は、この発明に係る光伝送システムにおける第3実施形態の構成を示す図である。この図4に示された光伝送システム3は、CWDM光伝送システムであって、光送信器110、光ファイバ伝送路120、光受信器140、光アイソレータ1

31、132、光カップラ133、134、及び、励起光源部135、136を備える。光ファイバ伝送路120は、光送信器110と光受信器140との間に敷設されている。光アイソレータ131、光カップラ133及び励起光源部135は、光ファイバ伝送路120の光送信器110側に設けられている。また、光アイソレータ132、光カップラ134及び励起光源部136は、光ファイバ伝送路120の光受信器140側に設けられている。

## 【0037】

この第3実施形態において、励起光源部135から出力された励起光は、光カップラ133を通過した後に光ファイバ伝送路120へ順方向に供給される。また、励起光源部136から出力された励起光は、光カップラ134を通過した後に光ファイバ伝送路120へ逆方向に供給される。すなわち、第3実施形態に係る光伝送システム3は、ラマン増幅手段として、光ファイバ伝送路120、光カップラ133、134、及び、励起光源部135、136により構成された分布定数型ラマン増幅器を備える。したがって、光送信器110から出力された多重化信号光は、光ファイバ伝送路120を伝搬する間にラマン増幅され、光受信器140に到達する。

## 【0038】

なお、この第3実施形態では、光ファイバ伝送路120に励起光が供給されるので、光ファイバ伝送路120は、波長 $1.39\mu\text{m}$ 付近においてOH基に起因した損失ピークが $0.33\text{dB/km}$ 以下であるのが好ましい。

## 【0039】

## (第4実施形態)

次に、この発明に係る光伝送システムの第4実施形態について説明する。図5は、この発明に係る光伝送システムにおける第4実施形態の構成を示す図である。この図5に示された光伝送システム4は、CWDM光伝送システムであって、信号光源部 $111_1\sim 111_4$ 、光合波器112、光ファイバ伝送路120、光分波器142、分散補償器143、光分波器 $144_1$ 、 $144_2$ 、受光部 $141_1\sim 141_4$ 、光カップラ133、134、及び、励起光源部135、136を備える。

## 【0040】

信号光源部 111<sub>1</sub>～111<sub>4</sub>それぞれは、互いに異なる波長の信号を出力する。光合波器 112 は、信号光源部 111<sub>1</sub>～111<sub>4</sub>それぞれから出力された各信号チャネルの光を合波する。信号光源部 111<sub>1</sub>～111<sub>4</sub>及び光合波器 112 により光送信器が構成される。光合波器 112 から出力される多重化信号光は、光周波数間隔が 400 GHz 以上 12.5 THz 以下であり、信号チャネル間隔が 10 nm 以上であるのが好ましい。

## 【0041】

光ファイバ伝送路 120 は、光合波器 112 と光分波器 142 との間に敷設されている。光カップラ 133 及び励起光源部 135 は、光ファイバ伝送路 120 の光合波器 112 側に設けられている。また、光カップラ 134 及び励起光源部 136 は、光ファイバ伝送路 120 の光分波器 142 側に設けられている。励起光源部 135 から出力された励起光は、光カップラ 133 を通過した後に光ファイバ伝送路 120 へ順方向に供給される。また、励起光源部 136 から出力された励起光は、光カップラ 134 を通過した後に光ファイバ伝送路 120 へ逆方向に供給される。

## 【0042】

すなわち、この第4実施形態に係る光伝送システム4も、ラマン増幅手段として、光ファイバ伝送路120、光カップラ133、134、及び、励起光源部135、136により構成された分布定数型ラマン増幅器を備える。したがって、光合波器112から出力された多重化信号光は、光ファイバ伝送路120を伝搬している間にラマン増幅され、光分波器142に到達する。なお、この第4実施形態では、光ファイバ伝送路120に励起光が供給されるので、光ファイバ伝送路120は、波長1.39 μm付近においてOH基に起因した損失ピークが0.33 dB/km以下であるのが好ましい。

## 【0043】

光分波器142は、光ファイバ伝送路120を伝搬してきた多重化信号光をを第1波長域と第2波長域とに分波し、該第1波長域の光成分を光分波器144<sub>1</sub>へ出力し、第2波長域の光成分を分散補償器143へ出力する。分散補償器14

3は、光分波器142から到達した第2波長域の光成分の波長分散を補償した後、光分波器144<sub>2</sub>へ出力する。分散補償器143としては、信号波長帯域において負の波長分散を有する分散補償光ファイバが適している。光分波器144<sub>1</sub>は、光分波器142から到達した第1波長域の光成分を信号チャネルごとに分波する。また、光分波器144<sub>2</sub>は、分散補償器143から到達した第2波長域の光成分を信号チャネルごとに分波する。そして、受光部141<sub>1</sub>～141<sub>4</sub>それぞれは、光分波器144<sub>1</sub>、144<sub>2</sub>によりそれぞれ分波された各信号チャネルの信号を受信する。

#### 【0044】

光分波器144<sub>1</sub>、144<sub>2</sub>としては、誘電体多層膜フィルタやファイバカップラ型フィルタが好ましく、コスト低減の観点から、隣接信号チャネル間でのガードバンドが5nm以上である安価なフィルタを使用するのが好ましい。

#### 【0045】

図6は、光ファイバ伝送路における伝送損失の波長依存性と波長分散の波長依存性との関係を示すグラフである。なお、図6において、グラフG610は伝送損失の波長依存性を示し、グラフG620は波長分散の波長依存性を示す。この図に示されたように、波長1400～1500nm程度の信号波長帯域内では、光ファイバ伝送路は、高波長側で累積波長分散の絶対値が大きく、短波長側で伝送損失が大きい。そこで、この第4実施形態では、光ファイバ伝送路120の累積波長分散が大きい高波長側に位置する信号チャネルの波長分散を補償する。また、光ファイバ伝送路120の伝送損失が大きい短波長側に位置する信号チャネルを、高波長側より大きい利得でラマン増幅する。

#### 【0046】

すなわち、この第4実施形態では、励起光源135、136から光ファイバ伝送路120に供給されるラマン増幅用励起光の波長及びパワーが適切に設定されることにより、多重化信号光に含まれる全信号チャネルのうち光ファイバ伝送路120における伝送損失が第1閾値以上である波長範囲内の信号チャネルが高利得でラマン増幅される。このとき、その他の信号チャネルもラマン増幅されてもよい。なお、第1閾値はシステムごとに適切に設定される。

## 【0047】

また、適切な分波特性を有する光分波器142を用いることにより、多重化信号光に含まれる全信号チャネルのうち光ファイバ伝送路120における累積波長分散が第2閾値以上である波長範囲内の信号チャネルの分散が分散補償器143により補償される。このとき、その他の波長の信号チャネルに対しては、更なる損失を回避するために、分散補償を行わないのが好ましい。なお、第2閾値もシステムごとに適切に設定される。

## 【0048】

このように、この第4実施形態に係る光伝送システム4は、上述の第1～第3実施形態それぞれの光伝送システムが奏する効果に加えて、以下のような効果をも奏することができる。すなわち、信号波長帯域のうち光ファイバ伝送路の伝送損失が大きい短波長側に位置する信号チャネルを高利得でラマン増幅し、あるいは、信号波長帯域のうち光ファイバ伝送路の累積波長分散が大きい長波長側に位置する信号チャネルを分散補償することで、より広い信号波長帯域であっても、多重化信号光に含まれる信号チャネルそれぞれを高品質でCWDM光伝送することができる。

## 【0049】

## (具体例)

次に、第3実施形態に係る光伝送システム3の具体例について説明する。ここでは、光ファイバ伝送路120は、長さを80kmとし、標準的なシングルモード光ファイバ(SMF)、分散シフト光ファイバ(DSF)、及び、非零分散シフト光ファイバ(NZ-DSF)のいずれかである。光送信器110から出力される多重化信号光は、波長帯域1510～1610nmの範囲内の20nm間隔の6チャネルとした。光ファイバ伝送路120におけるラマン増幅のNet利得 $G_{net}$ が-17dBとなるように、励起光源部135、136から出力される励起光の波長及びパワーを設定した。励起チャネル数は2又は3とした。励起チャネル数が2の場合、各励起チャネルの波長は1420nm及び1490nmとした。励起チャネル数が3の場合、各励起チャネルの波長は1420nm、146nm及び1490nmとした。光アイソレータ131、132それぞれの挿入損

失を 0.6 dB とした。

【 0 0 5 0 】

波長 1550 nm における伝送損失は、シングルモード光ファイバでは 0.195 dB/km であり、分散シフト光ファイバでは 0.210 dB/km であり、非零分散シフト光ファイバでは 0.200 dB/km であった。非零分散シフト光ファイバの波長 1380 nm における伝送損失は 0.32 dB/km であった。ラマン増幅効率を示す  $FOM-r (= g_R / A_{eff})$  は、シングルモード光ファイバでは 0.37 / W / km であり、分散シフト光ファイバでは 0.87 / W / km であり、非零分散シフト光ファイバでは 0.67 / W / km であった。

【 0 0 5 1 】

図 7 ～ 図 9 は、それぞれ具体例の光伝送システムにおける利得スペクトルである。図 7 は、光ファイバ伝送路 120 として標準的なシングルモード光ファイバを用いた場合の利得スペクトルである。この図 7 において、グラフ G710 はラマン増幅しないときの Net 利得、グラフ G720 は励起チャネル数が 2 のときの Net 利得、グラフ G730 は励起チャネル数が 3 のときの Net 利得をそれぞれ示す。図 8 は、光ファイバ伝送路 120 として分散シフト光ファイバを用いた場合の利得スペクトルを示す。この図 8 において、グラフ G810 はラマン増幅しないときの Net 利得、グラフ G820 は励起チャネル数が 2 のときの Net 利得、グラフ G830 は励起チャネル数が 3 のときの Net 利得をそれぞれ示す。また、図 9 は、光ファイバ伝送路 120 として非零分散シフト光ファイバを用いた場合の利得スペクトルを示す。この図 9 において、グラフ G910 はラマン増幅しないときの Net 利得、グラフ G920 は励起チャネル数が 2 のときの Net 利得、グラフ G930 は励起チャネル数が 3 のときの Net 利得をそれぞれ示す。なお、図 10 には、各具体例の光伝送システムにおける励起光パワーが示されている。すなわち、図 10 には、標準的なシングルモード光ファイバ (SMF) が適用された光ファイバ伝送路へ供給される励起チャネル数 2 及び 3 の各励起光パワー、分散シフト光ファイバ (DSF) が適用された光ファイバ伝送路へ供給される励起チャネル数 2 及び 3 の各励起光パワー、非零分散シフト光ファイバ (NZDSF) が適用された光ファイバ伝送路へ供給される励起チャネル数

2 及び 3 の各励起光パワーが示されている。

【 0 0 5 2 】

これら図 7 ～ 図 1 0 から分かるように、光ファイバ伝送路 1 2 0 としていずれの種類の光ファイバが適用された場合にも、励起チャンネル数が 2 であっても良好な利得スペクトルが得られ、また、励起チャンネル数が 3 であればさらに良好な利得スペクトルが得られた。増幅される出力信号光のレベル差は 3 d B 以下であり、この点でも良好な結果が得られた。OH 基に起因した吸収損失が小さい非零分散シフト光ファイバが適用された場合に、信号波長帯域における短波長側の励起光の所要パワーは小さかった。

【 0 0 5 3 】

なお、この発明に係る光伝送システムは、CWDM 光伝送システムとして、光源数を少なく維持した状態でより広い波長帯域におけるラマン増幅を可能にするため、励起光に含まれる各励起チャンネルの光周波数は、信号光に含まれる各信号チャンネルの光周波数とは異なる光周波数にラマン増幅ピークが位置するように設定されている。すなわち、信号チャンネルの光周波数は、励起チャンネルの光周波数から 1 3 . 2 T H z 低い光周波数と異なっている。具体的には、上記励起光に含まれる各励起チャンネルの光周波数は、上記信号光に含まれる各信号チャンネルの光周波数から 6 2 . 4 G H z ( 5 n m ) 以上離れた光周波数にラマン増幅ピークが位置するように設定されていることが好ましい。一方、上記励起光に含まれる各励起チャンネルの光周波数は、上記信号光に含まれる各信号チャンネルの光周波数から 1 2 4 8 G H z ( 1 0 n m ) 以上離れない光周波数にラマン増幅ピークが位置するように設定されているのが好ましい。これにより、CWDM 光伝送システムにおいて、励起光光源の数を少なく保ったままより広い波長帯域において高い利得平坦度が得られる。

【 0 0 5 4 】

以下に、8 チャンネルの信号光を一括増幅する場合と 4 チャンネルの信号光を一括増幅する場合について説明する。

【 0 0 5 5 】

( 8 チャンネル信号光の一括増幅 )

このでは、8チャンネル信号光を利用した集中定数型ラマン増幅器についての検討を行う。信号チャンネル数が8チャンネルの場合、信号波長帯域の帯域幅は140 nmになるので、通常、一括ラマン増幅を行うのは難しい。そこで、信号チャンネルと励起チャンネルを交互に配置する。信号チャンネル間隔が狭くなるDWDMにおいて、このようなチャンネル配置を実現するためには、隣接するチャンネルの間隔に注意する必要があるが、この発明に係る光伝送システムにおけるCWDMでは、信号チャンネルの間隔が20 nmと離れている。kのため、励起光光源としてファイバグレーティングレーザ（FGL）を利用する場合、信号光と励起光の伝搬に起因した後方レイリー散乱光との干渉はさほど問題にならないと考えられる。

## 【0056】

図11は、8チャンネル信号光の一括ラマン増幅を評価するために用意された実験系の構造を示す図である。この図11の実験系（LRA）は、送信器に含まれる光合波器500と、受信器として用意された光スペクトルアナライザ505を備えるとともに、これら光合波器500と光スペクトルアナライザ505との間に順に配置された光アイソレータ501、光カプラ502、ラマン増幅用光ファイバ503、光サーキュレータ504を備える。なお、この実験系は、Net利得が+10 dBになるよう（8チャンネルCWDM信号の入力パワーは+0 dBm/CH、出力パワーが+10 dBm/CH）、6チャンネル励起光が利用される。

## 【0057】

光合波器500は、波長1470～1610 nmであってチャンネル間隔20 nmの8信号チャンネルを合波する。光カプラ502は、波長1360 nmの励起光をラマン増幅用光ファイバ503に前方から供給するとともに、光アイソレータ501を通過した信号光をラマン増幅用光ファイバ503へ通過させる。ラマン増幅用光ファイバ503は、3 mの非零分散シフト光ファイバである。光サーキュレータ504は、波長1360 nm、1390 nm、1405 nm、1430 nm、1460 nm、1500 nmの励起チャンネルを含む励起光をラマン増幅用光ファイバ503に後方から供給する一方、ラマン増幅用光ファイバ503からの増幅された信号光を光スペクトルアナライザ505へ通過させる。供給される励起チャンネルごとの励起パワーが図12に示されている。なお、ラマン増幅光フ



ファイバ503は、負の波長分散を有するのが好ましい。これは、通常の光ファイバ伝送路が信号波長帯域においてせいの波長分散を有するため、この波長分散との整合性をとる必要があるからである。さらに、このラマン増幅用光ファイバは、絶対値の大きな波長分散を有するのが好ましく、その値は $-20 \text{ ps/nm/km}$ 以下、さらには $-60 \text{ ps/nm/km}$ 以下であるのが好ましい。また、この実験系では、後方励起用の励起チャネルとして波長 $1405 \text{ nm}$ の励起チャネルを利用しているが、実際には波長 $1410 \text{ nm}$ の励起チャネルの利用を想定している（Net利得などにはほとんど影響なし）。チャネル波長 $1410 \text{ nm}$ の励起光が利用可能であれば、8入力1出力の光合波器や光サーキュレータを利用して信号光と合波することが可能になるので、低コストでのLRA製造が可能になる。

## 【0058】

図13は、この実験系における励起チャネルと信号チャネルの配置を説明するための図である。この図13（a）に示されたように、4チャネル信号光の一括ラマン増幅では、波長 $1460 \text{ nm}$ と $1500 \text{ nm}$ の2チャネル励起光を利用することで、信号波長帯域の長波長側4チャネルの信号光が一括ラマン増幅される。一方、8チャネル信号光の一括ラマン増幅では、図13（b）に示されたように、上記2チャネル（波長 $1460 \text{ nm}$ 、 $1500 \text{ nm}$ ）の励起光を利用して信号波長帯域の長波長側4チャネルの信号光をラマン増幅するとともに、波長 $1360 \text{ nm}$ 、 $1390 \text{ nm}$ 、 $1405 \text{ nm}$ の4チャネル励起光を追加供給することで短波長側4チャネルの信号光もラマン増幅することが可能になる。このように励起チャネルと増幅対象の信号チャネルを配置することにより、4チャネル信号光の一括ラマン増幅から8チャネル信号光一括ラマン増幅へのアップグレードを容易に実現することができる。

## 【0059】

なお、図14には、信号波長帯域の長波長側4チャネル信号光をラマン増幅する際のNet利得（図14（a））とNet雑音特性（NF: Noise Figure、図14（b））のシミュレーション結果が示されている。ラマン増幅用光ファイバに供給する励起パワーは、波長 $1460 \text{ nm}$ の励起チャネルで $358.9 \text{ mW}$

、波長1500nmの励起チャンネルで175.1mWだけ必要となる。

#### 【0060】

図15には、この実験系（8チャンネル信号光の一括ラマン増幅を行うLRA）における利得スペクトル（図15（a））、Net利得の波長依存性（図15（b））、及びNetNFの波長依存性（図15（c））がそれぞれ示されている。なお、図15（b）において、グラフG1430aは実測されたNet利得を示し、グラフG1430bはシミュレーション結果を示す。また、図15（c）において、グラフG1440aは実測されたNetNF、グラフG1440bはシミュレーション結果を示す。

#### 【0061】

図15（a）では、波長1460nm（図中の矢印P1）と波長1500nm（図中の矢印P2）において励起光の後方励起散乱成分が観測された。また、図15（b）では、Net利得は10dB程度であることが分かる。なお、図15（c）において、短波長側で観測される実測値とシミュレーション結果とのNFの違いは、実測とシミュレーションでは前方励起光と後方励起光のパワー配分が若干異なることや、シミュレーションでは、励起光の後方レイリー散乱成分が考慮されていないためであると推測される。供給された励起光に含まれる各励起チャンネルのパワーは図12の表に示す通りであり、励起光のトータルパワーは1121mW程度である。この場合、高出力レーザを使用し、前方励起パワーと後方励起パワーの配分を変更したとしても、合計10個（波長130nmでの前方励起：2個、波長1360nm、1390nmでの後方励起：4個、その他の波長4個）の励起光源（励起LD）が必要になる。

#### 【0062】

なお、図16（a）は8チャンネル信号光の一括ラマン増幅を行う実験形のMPI（Multi-Path Interference）クロストークのシミュレーション結果を示し、図16（b）はこの実験系における位相シフト量のシミュレーション結果を示す。これらMPIクロストーク及び位相シフト量とも問題ないレベルである。

#### 【0063】

（4チャンネル信号光の一括増幅）

次に、4チャンネル信号光の一括ラマン増幅の場合について説明する。図17は、CWDMにおける利得スペクトルと、励起光及び信号光との関係を示すグラフである。CWDMでは、信号チャンネル間隔が広いため、DWDMと異なり各信号チャンネルにおける利得のみを揃えることにより利得平坦度を高めることができる。換言すれば、少ない励起光光源（励起LD）を用いても利得平坦度を高めることが可能である。例えば、図19に示されたように、4チャンネル信号光を一括ラマン増幅するには、2励起チャンネルの励起光を利用することにより可能である。この図1に示されたように、2チャンネル励起光であっても、DWDMの利得偏差Dと比較してCWDMの利得偏差Cの方が著しく小さくなることか分かる（利得平坦度が高い）。なお、この2チャンネル励起光に由来する利得スペクトル1710は、信号波長帯域において2つのラマン増幅ピークを有する。この場合、新たに励起チャンネルを追加することにより利得平坦度をさらに高めることも可能である。

#### 【0064】

図18の表は、CWDM信号（4チャンネル）の波長と励起光波長の関係を示している。このように、波長1400nm～1700nm波長帯でラマン増幅を行うためには、励起光に含まれる励起チャンネルの波長間隔（チャンネル間隔）は、少なくとも37.5nm（この場合は40nm程度）離れていればよい。

#### 【0065】

励起光は、各励起チャンネルの光周波数よりも13.2THz低い光周波数（ラマン利得スペクトルのピーク周波数）がCWDM信号光の各信号チャンネルから少なくとも62.4GHz（5nm）離れていることが好ましい。図17には、ラマン利得係数のスペクトル形状が示されているが、ラマン増幅ピークから2496GHz（10nm）離れると、ラマン利得係数は15%程度低下する。このラマン増幅ピークの光周波数に信号チャンネルが配置されると、信号チャンネル間隔が2496GHzのときON-OFF利得の偏差が15%以上と大きくなってしまふ。したがって、ラマン増幅ピークから62.4GHzはなれた位置に信号チャンネルが配置されれば、より利得偏差が小さくなる方向に働き有利な条件と言える。

## 【 0 0 6 6 】

また、複数励起チャネルを用意する場合には、互いに隣接した励起チャネルの波長間隔（チャネル間隔）は、少なくとも  $4680\text{ GHz}$ （約  $3.7.5\text{ nm}$ ）以上であることが好ましい。なお、信号波長帯域が  $100\text{ nm}$ 以下である場合、励起光に含まれる励起チャネル数  $m$  と信号光に含まれる信号チャネル数  $n$  は、 $m \leq n/2$  なる関係を満たすのが好ましい。さらに、信号波長帯域が  $100\text{ nm}$ 以上である場合には、励起光に含まれる励起チャネル数  $m$  と信号光に含まれる信号チャネル数  $n$  は、 $m \leq (n+4)/2$  なる関係を満たすのが好ましい。

## 【 0 0 6 7 】

ここで、ラマン増幅に利用する光ファイバ（ラマン増幅用光ファイバ）の長さは、該光ファイバ自身が有するラマン利得係数や伝送損失にもよるが、実用上問題となるのは、信号光と同一方向へ伝搬する多経路反射光成分間に生じる  $\text{MPI}$  である。この場合、信号光と多経路反射光との光パワー比率を  $\text{MPI}_{\text{crosstal}}$  (dB) ( $=P_{\text{signal}}(\text{dB}) - P_{\text{MPI}}(\text{dB})$ ) とすると、この値が  $30\text{ dB}$ を下回らないようラマン増幅器を設計するのが好ましい。もし、 $\text{MPI}_{\text{crosstalk}}$  が  $30\text{ dB}$ を下回る場合には、図 20 に示されたように、ラマン増幅用光ファイバ 610、620 の間に配置された光アイソレータ 632 を迂回するバイパス線路を設けてもよい。なお、図 20 のラマン増幅器において、631 はラマン増幅光ファイバ 620 を伝搬した励起光を一旦バイパス線路に導くための光カプラであり、633 はバイパス線路を伝搬した励起光をラマン増幅用光ファイバ 610 に導くための光カプラである。また、634 はラマン増幅用光ファイバ 620 に励起光を供給するための光カプラである。このラマン増幅器では、光カプラ（WDM フィルタ）や光アイソレータが利用されているが、光サーキュレータを利用することも可能である。

## 【 0 0 6 8 】

ラマン増幅用光ファイバとしては、より効率的に非線形位相シフトを発生させるため、非線形屈折率  $N_2$  は  $3.5 \times 10^{-20} (\text{m}^2/\text{W})$  以上であるのが好ましい。また、実効断面積  $A_{\text{eff}}$  についても、より効率的に非線形位相シフトを発生させるため、 $30\text{ mm}^2$  以下、さらには  $15\text{ mm}^2$  以下であるのが好まし

い。したがって、 $N_2/A_{eff} \geq 1.7 \times 10^{-9} \text{ (1/W)}$ 、ひいては $N_2/A_{eff} \geq 3.0 \times 10^{-9} \text{ (1/W)}$ であると、伝送特性の改善に効果的である。

## 【0069】

ラマン増幅効率を高めるという点において、光ファイバの損失は信号波長帯域において $1.0 \text{ dB/km}$ 以下であるのが望ましい。また、励起光波長付近のOH基に起因した吸収損失による損失増大を考慮すると、 $1.38 \sim 1.39 \mu\text{m}$ 波長帯におけるOH基に起因した損失増大分は $0.5 \text{ dB/km}$ 以下となるのが好ましい。

## 【0070】

さらに、ラマン増幅に使用される光ファイバについて、該光ファイバの波長分散は負であるのが好ましい。これは、通常の光ファイバ伝送路が、信号波長帯域において正の波長分散を有するため、この波長分散との整合性を取るためである。さらに、該波長分散の絶対値は大きいことが好ましく、その値は $-20 \text{ ps/nm/km}$ 以下、さらには $-60 \text{ ps/nm/km}$ 以下であるのが好ましい。また、ラマン増幅用光ファイバと通常の光ファイバとの接続損失は、ラマン増幅効率を考慮した場合に $0.5 \text{ dB}$ 以下であるのが好ましい。

## 【0071】

## 【発明の効果】

以上のようにこの発明によれば、光周波数間隔が $400 \text{ GHz}$ 以上 $12.5 \text{ THz}$ 以下である複数信号チャネルが多重化された信号光を光ファイバ伝送路により伝送するとともに、該光ファイバ伝送路の少なくとも一部を含み、ラマン増幅用励起光により該信号光をラマン増幅するラマン増幅手段を備えることにより、CWDM光伝送において、多重化された信号チャネルそれぞれの高品質な伝送を可能にする。

## 【0072】

さらに、励起チャネルの光周波数を、信号チャネルの光周波数とは異なる光周波数にラマン増幅ピークが位置するように設定することにより、より広い波長帯域において高い利得平坦度が実現できる。

【図面の簡単な説明】

【図 1】

この発明に係る光伝送システムにおける第1実施形態の構成を示す図である。

【図 2】

信号チャネル及び励起チャネルそれぞれの一配置例を説明するための図である。

【図 3】

この発明に係る光伝送システムにおける第2実施形態の構成を示す図である。

【図 4】

この発明に係る光伝送システムにおける第3実施形態の構成を示す図である。

【図 5】

この発明に係る光伝送システムにおける第4実施形態の構成を示す図である。

【図 6】

光ファイバ伝送路における伝送損失の波長依存性と波長分散の波長依存性の関係を示すグラフである。

【図 7】

具体例の光伝送システム（光ファイバ伝送路としてSMF含む）における利得スペクトルである（その1）。

【図 8】

具体例の光伝送システム（光ファイバ伝送路としてDSF含む）における利得スペクトルである（その2）。

【図 9】

具体例の光伝送システム（光ファイバ伝送路としてNZDSFを含む）における利得スペクトルである（その3）。

【図 10】

各具体例の光伝送システムにおける励起光パワーを示すグラフである。

【図 11】

実験系として用意されたラマン増幅器の構成を示す図である。

【図 12】

図 1 1 に示された実験系で利用される各励起チャンネルのパワーを示す表である。

【図 1 3】

4 チャンネル信号光の一括ラマン増幅から 8 チャンネル信号光の一括ラマン増幅へのグレードアップを説明するための励起チャンネル及び信号チャンネルの配置を示す図である。

【図 1 4】

図 1 1 の実験系において、信号波長帯域の長波長側 4 信号チャンネルの Net 利得及び雑音特性の各波長依存性を示すグラフである。

【図 1 5】

図 1 1 の実験系の利得スペクトル、Net 利得の波長依存性、及び Net 雑音特性の波長依存性をそれぞれ示すグラフである。

【図 1 6】

図 1 1 の実験系において、MPI クロストーク及び位相シフト量の各波長依存性を示すグラフである。

【図 1 7】

ラマン利得スペクトルの一例を示す図である。

【図 1 8】

4 チャンネル信号光と励起チャンネルとの関係を示す表である。

【図 1 9】

4 チャンネル信号光の一括ラマン増幅における信号チャンネルと励起チャンネルの配置関係を示す図である。

【図 2 0】

MPI クロストークを改善するためのラマン増幅器における主要部の構成を示す図である。

【符号の説明】

1 ～ 4 … 光伝送システム、1 1 0 … 光送信器、1 1 1 … 信号光源、1 1 2 … 光合波器、1 2 0 … 光ファイバ伝送路、1 3 0 … ラマン増幅器、1 3 1, 1 3 2 … 光アイソレータ、1 3 3, 1 3 4 … 光カプラ、1 3 5, 1 3 6 … 励起光源部、1

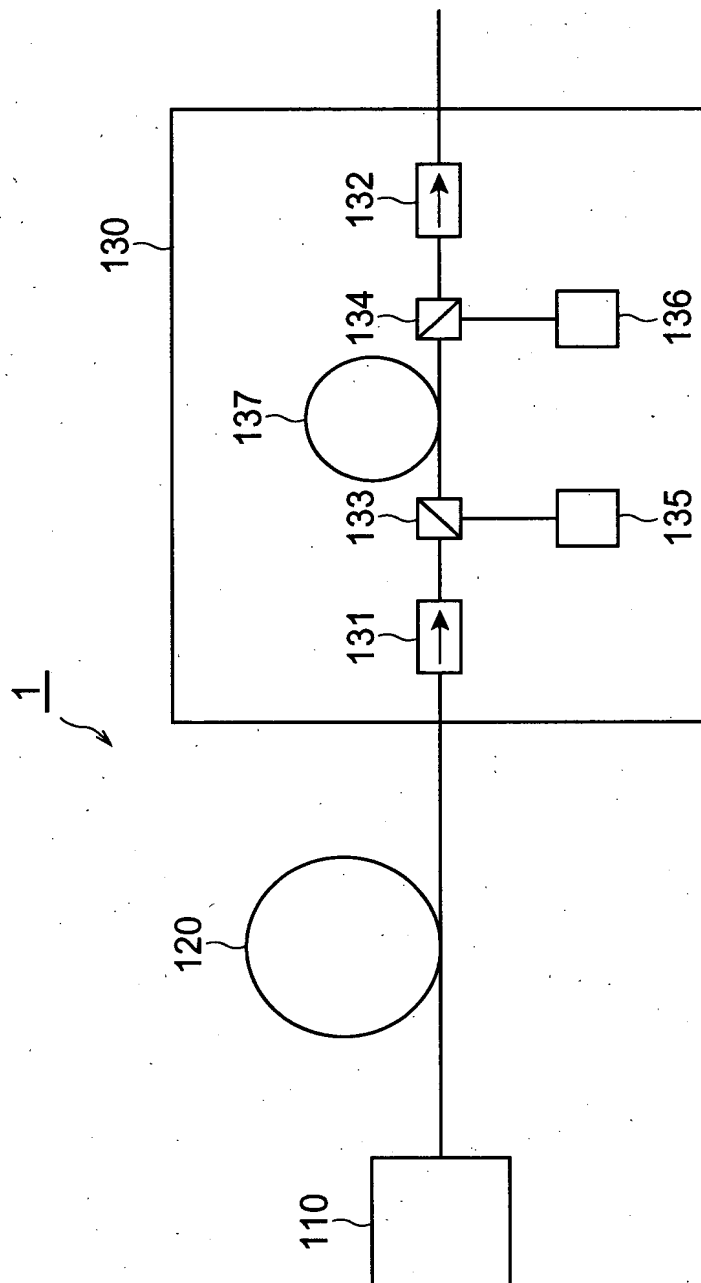
3 7 … ラマン増幅用光ファイバ、 1 4 0 … 光受信器、 1 4 1 … 受光部、 1 4 2 …  
光分波器、 1 4 3 … 分散補償器、 1 4 4 … 光分波器、 2 3 0 … ラマン増幅器。



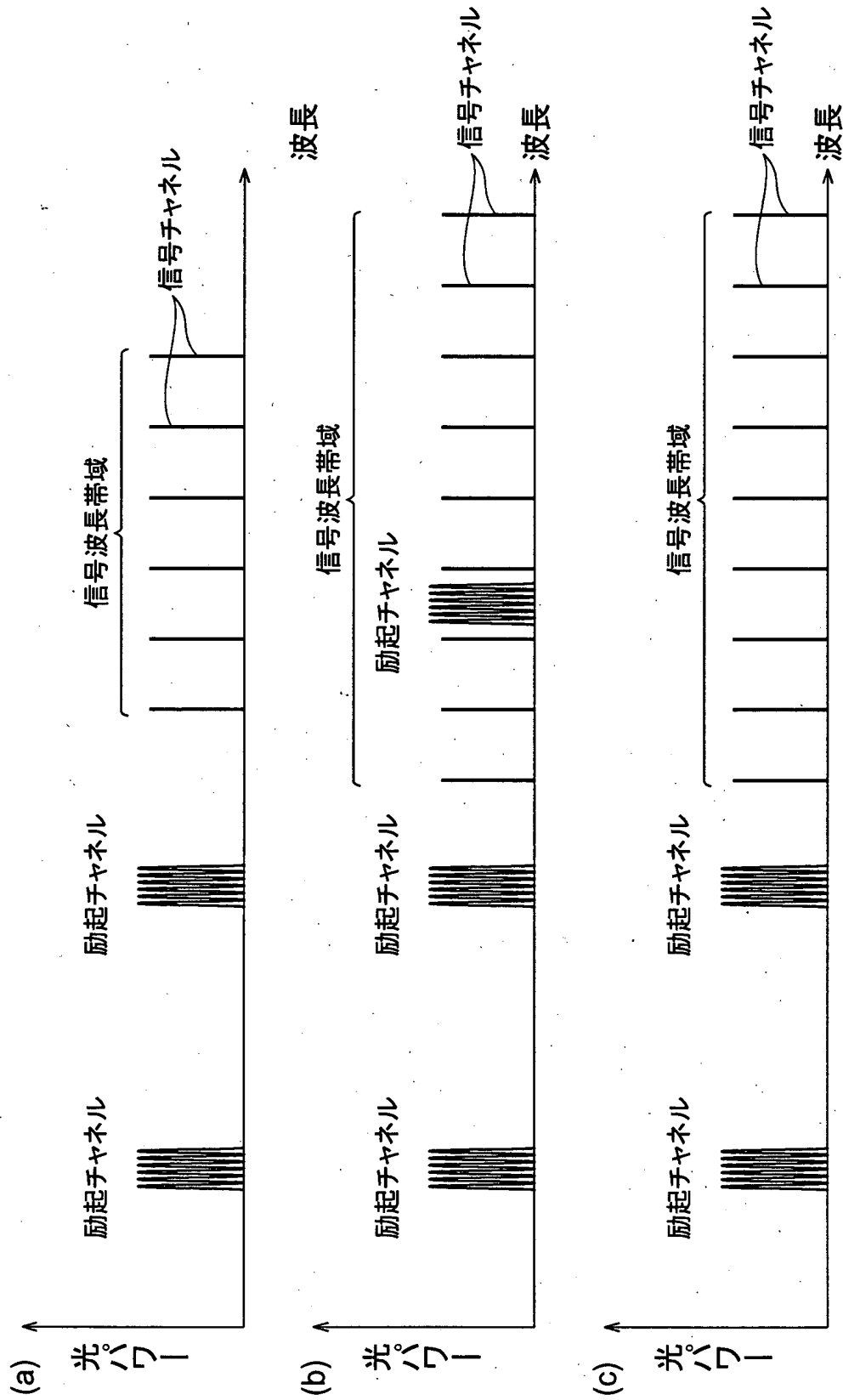
【書類名】

図面

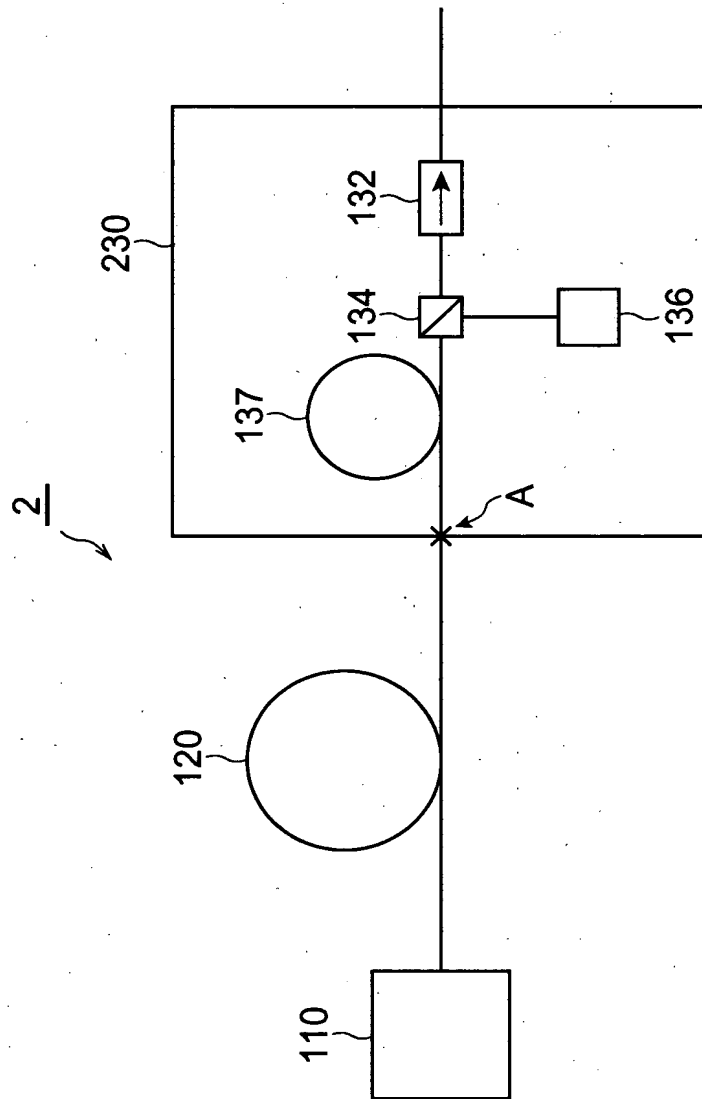
【図 1】



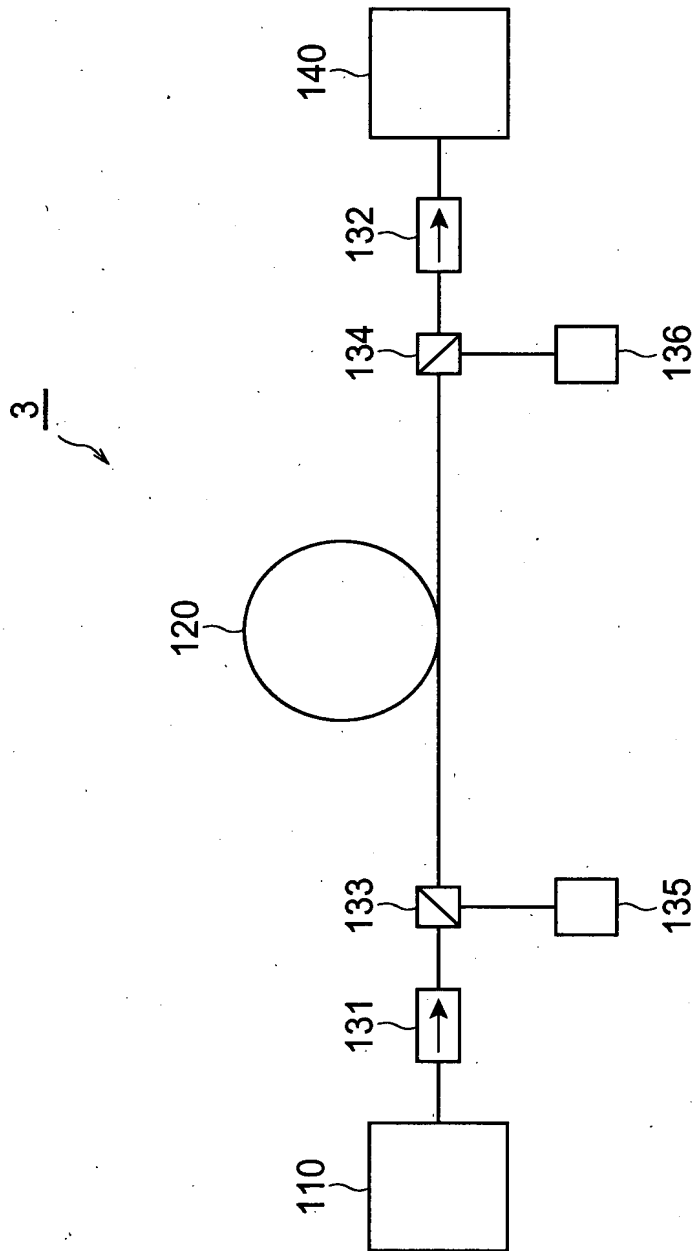
【図 2】



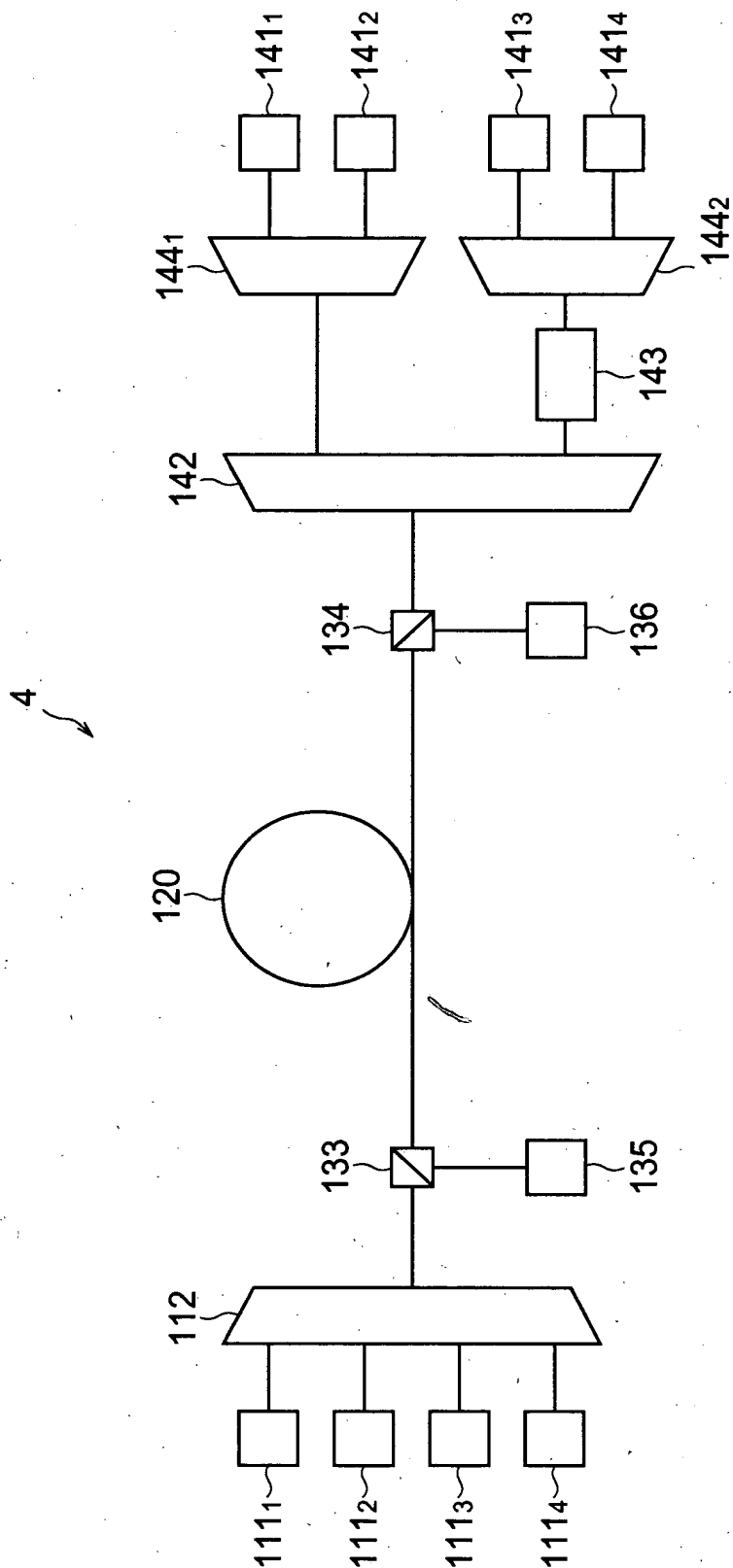
【図 3】



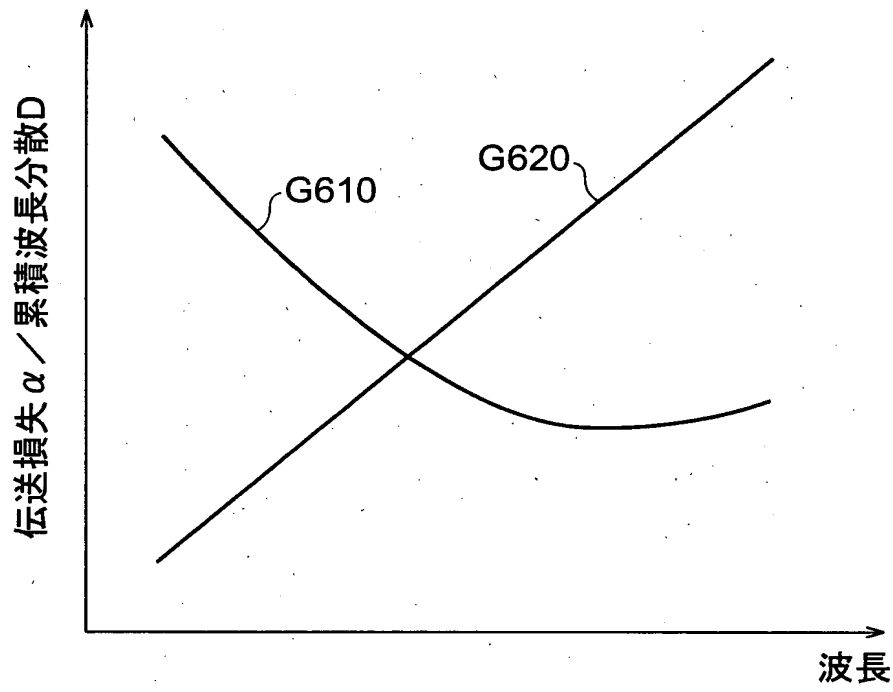
【図 4】



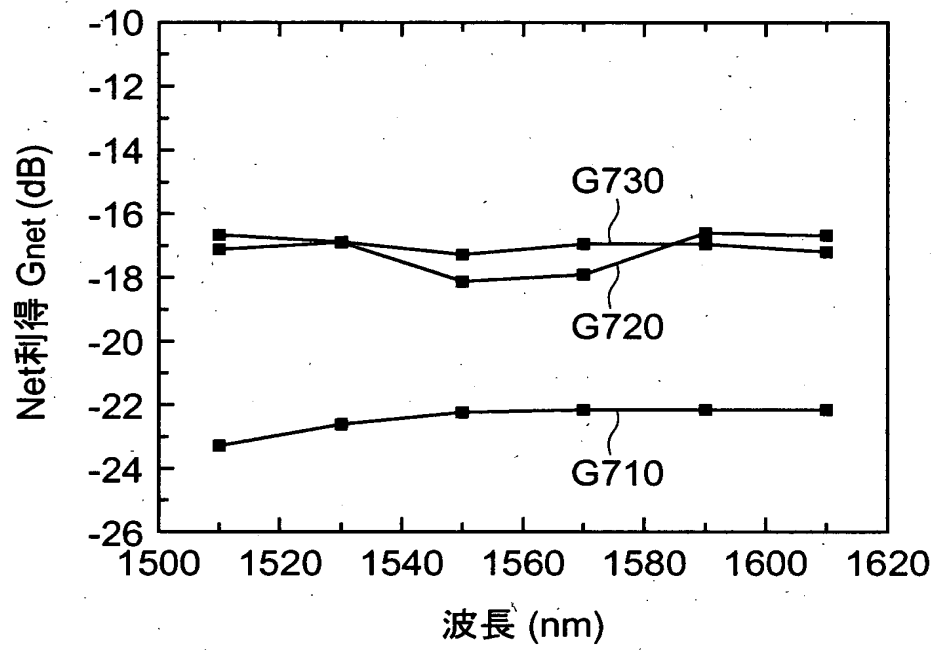
【図 5】



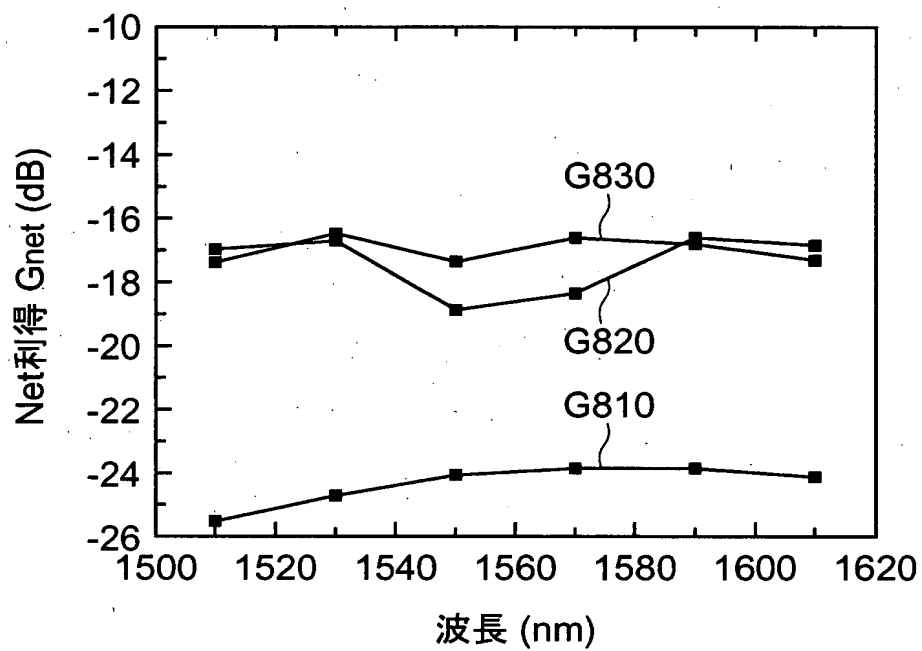
【図6】



【図 7】

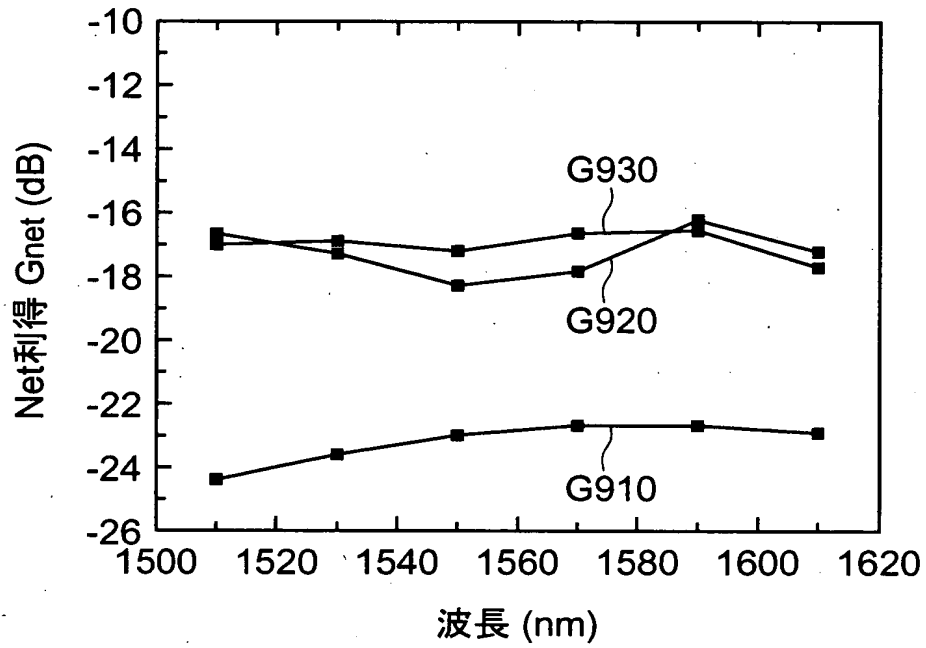


【図 8】

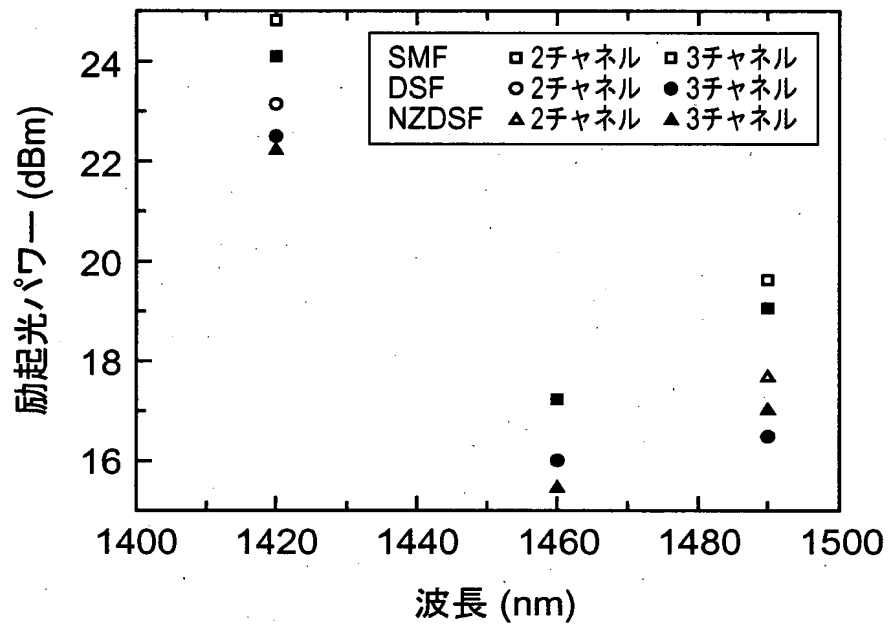




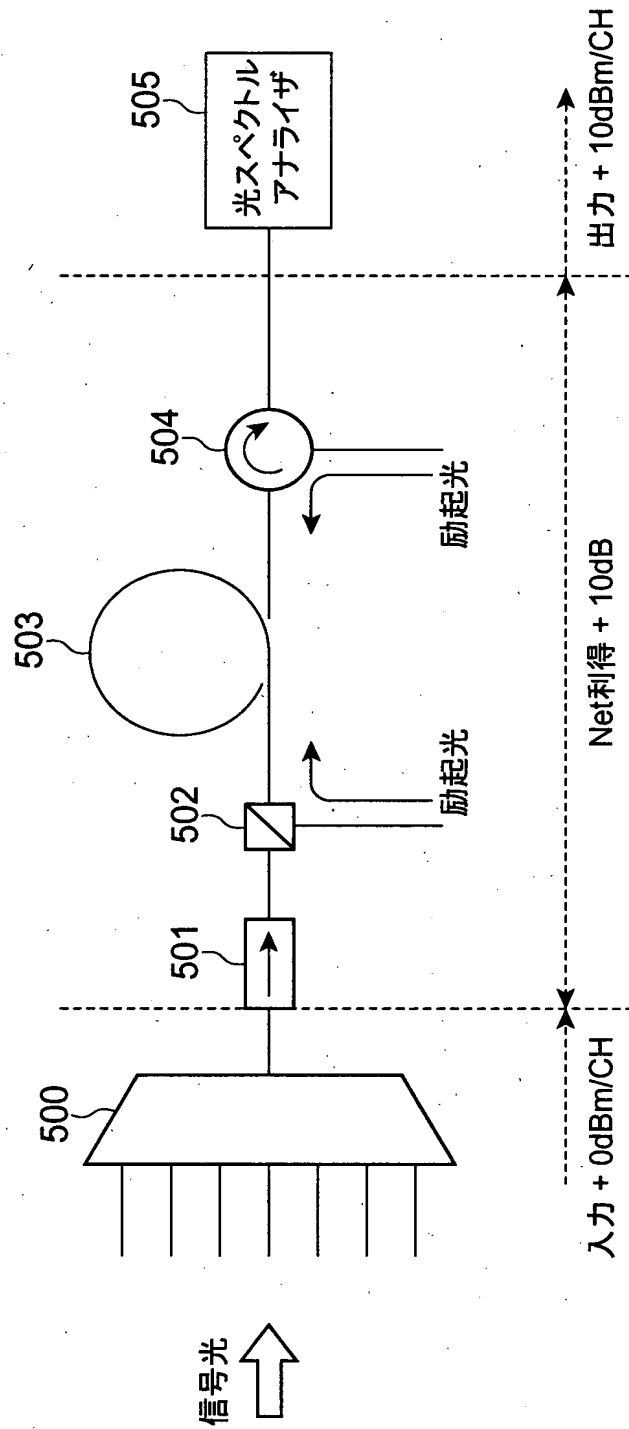
【図 9】



【図 1 0】



【図 11】



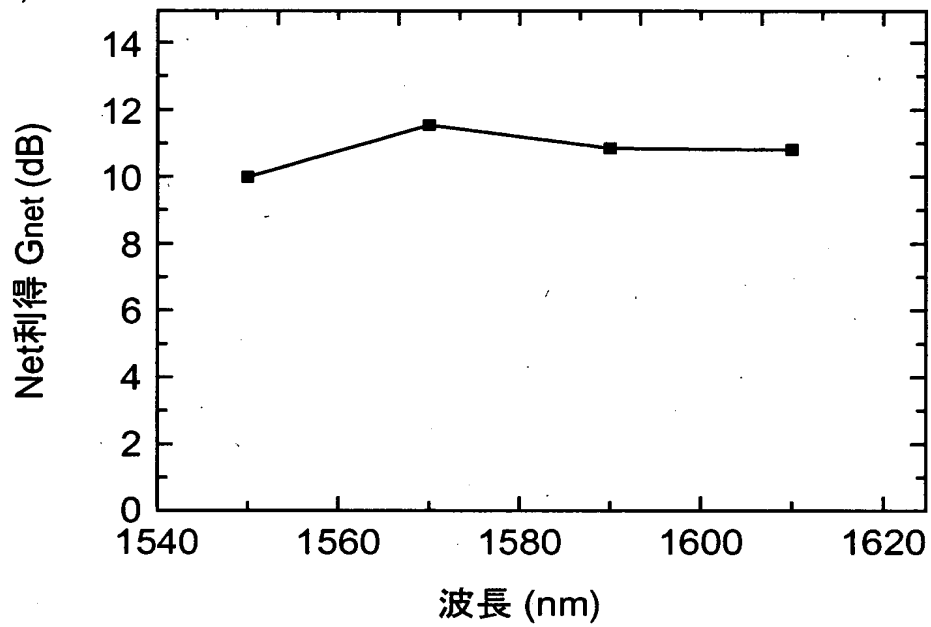
【図 1 2】

励起方向	波長 (nm)	パワー (mW)
前方	1360	211.6
後方	1360	613.8
	1390	235.5
	1405	11.2
	1430	11.4
	1460	6.6
	1500	23.8

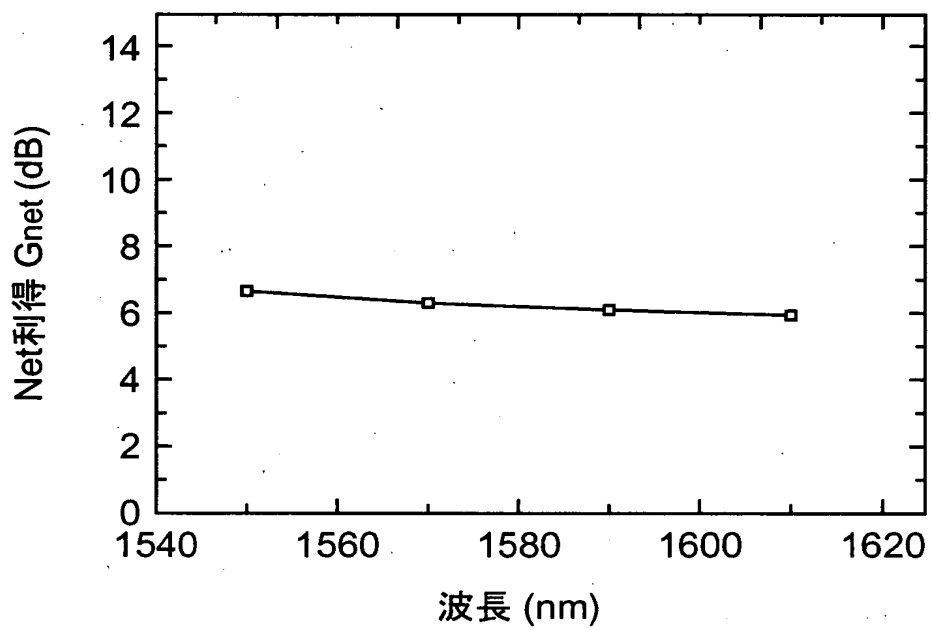


【図 14】

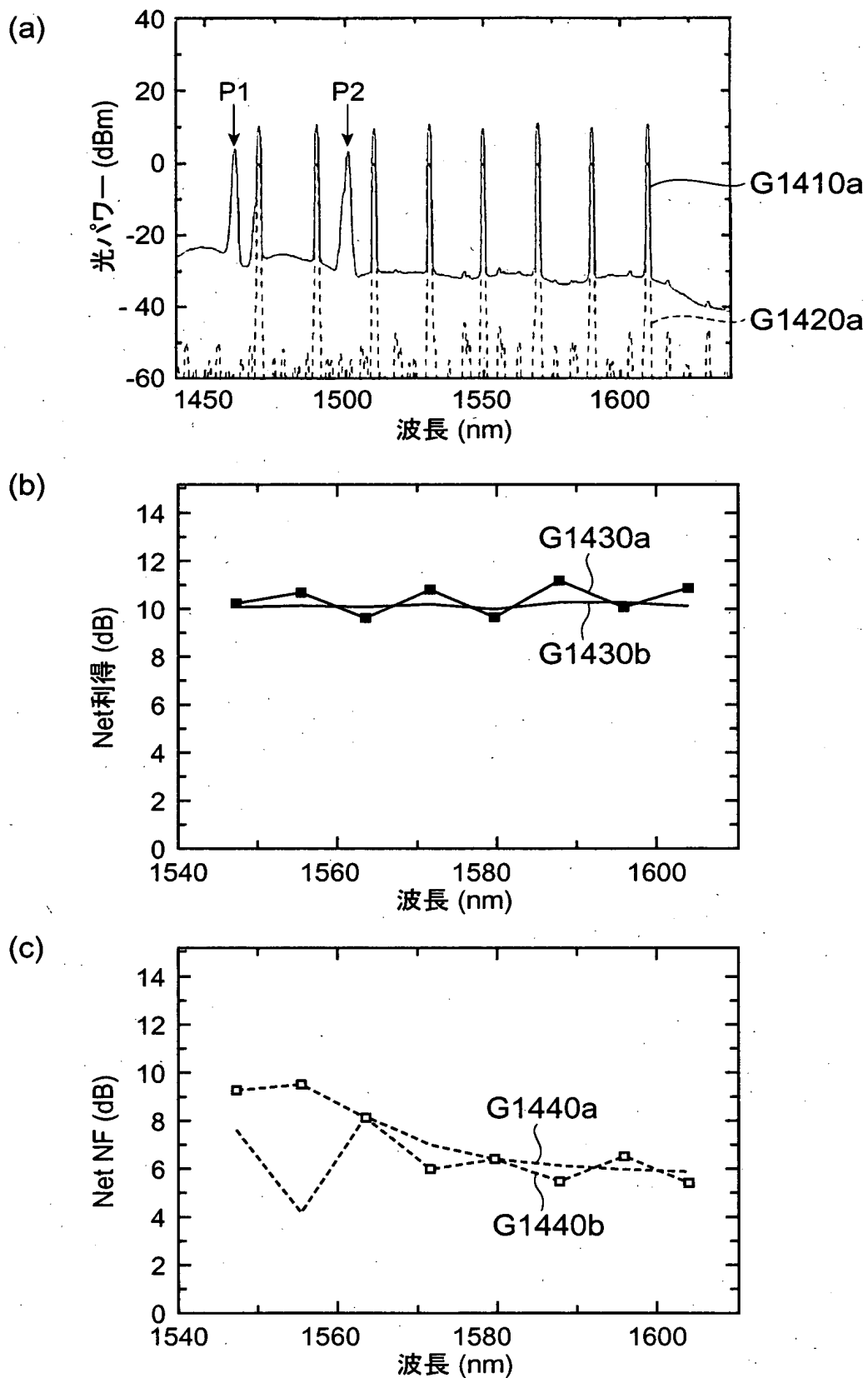
(a)



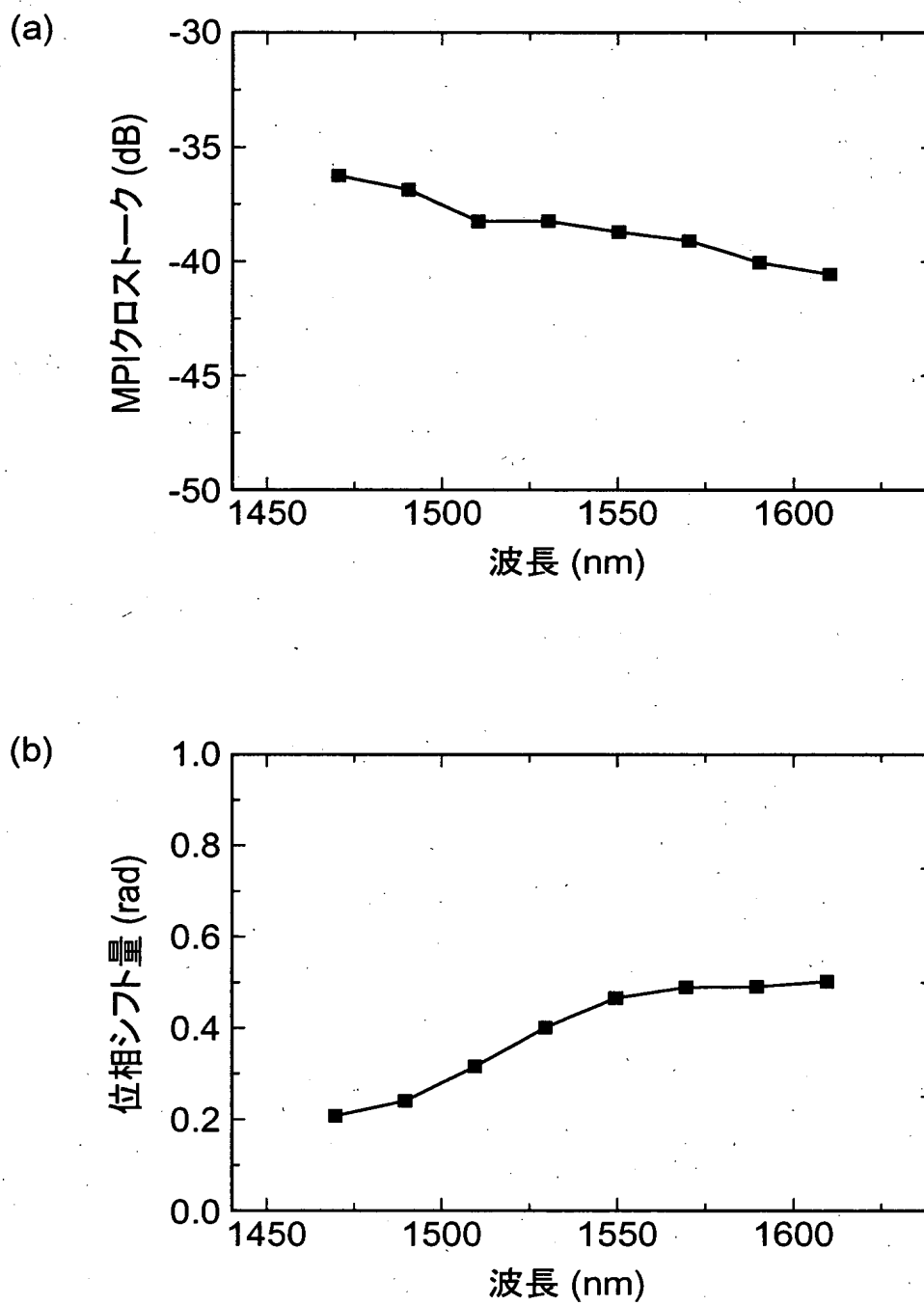
(b)



【図15】

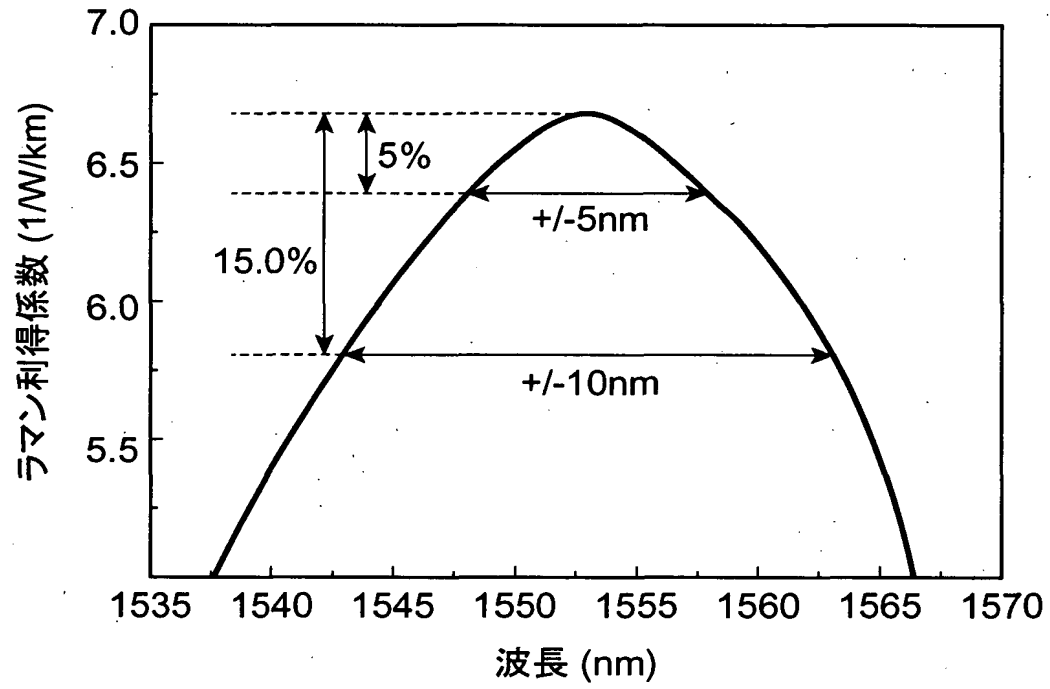


【図 1 6】





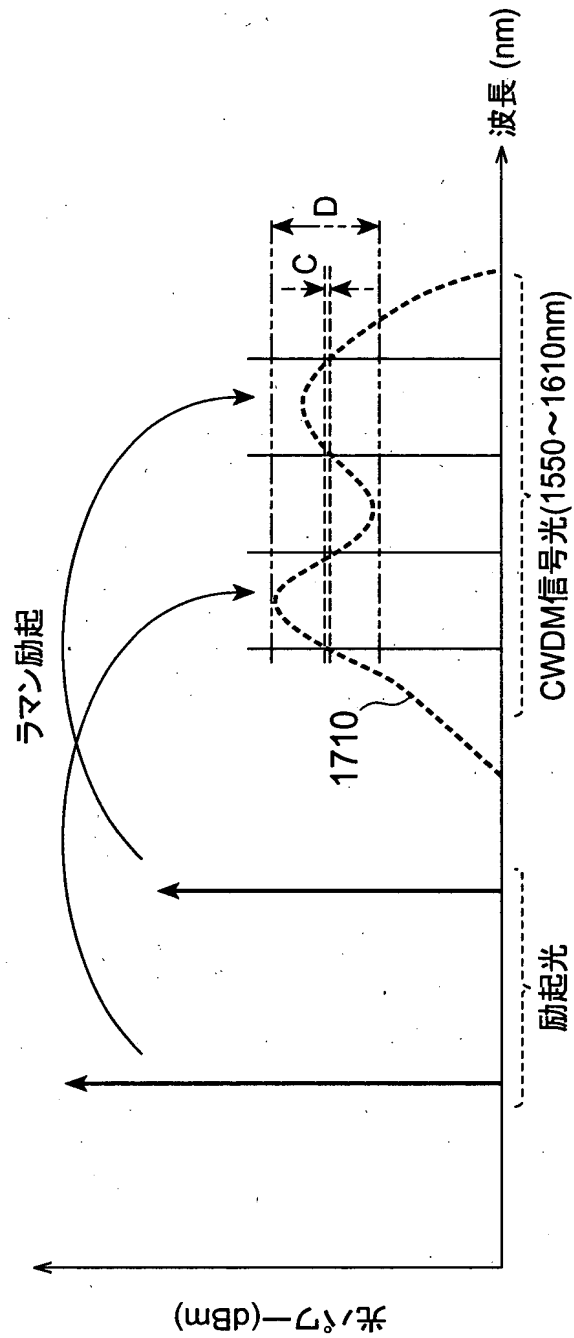
【図 1 7】



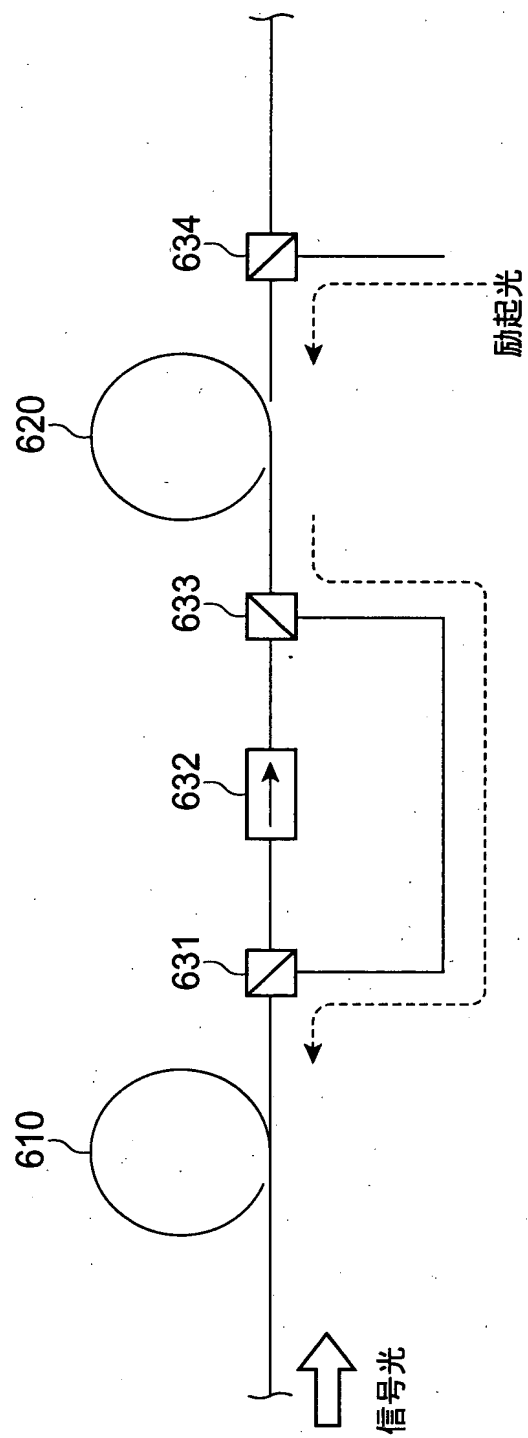
【図 1 8】

信号光波長 (nm) (チャンネル間隔:20nm)	励起光波長 (nm)
1470～1530	1387.5,1427.5
1550～1610	1457.5,1500
1510～1570	1422.5,1465

【図 19】



【図 20】



【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 多重化された複数信号チャネルそれぞれにおける高品質伝送を可能にする光伝送システムを提供する。

【解決手段】 光周波数間隔が400GHz以上12.5THz以下である複数信号チャネルが多重化された信号光は、光送信器(110)から光ファイバ伝送路(120)を介してラマン増幅器(130)に伝送される。ラマン増幅器(130)では、励起光源部(135,136)からの励起光が光カップラ(133,134)を経て光ファイバ(137)に供給される。ラマン増幅器(130)に入力された多重化信号光は、光アイソレータ(131)と光カップラ(133)を経て光ファイバ(137)に到達し、光ファイバ(137)においてラマン増幅される。このラマン増幅された多重化信号光は、光カップラ(134)と光アイソレータ(132)を経て、ラマン増幅器(130)から出力される。

【選択図】 図1

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号 [000002130]

1. 変更年月日 1990年 8月29日

[変更理由] 新規登録

住 所 大阪府大阪市中央区北浜四丁目5番33号  
氏 名 住友電気工業株式会社

50212-512  
MIYAMOTO et al.

日 本 国 特 許 庁  
JAPAN PATENT OFFICE

June 27, 2003

McDermott, Will & Emery  
& Emery

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office

出 願 年 月 日

Date of Application:

2002年 6月28日

出 願 番 号

Application Number:

特願2002-190967

[ ST.10/C ]:

[ JP 2002-190967 ]

出 願 人

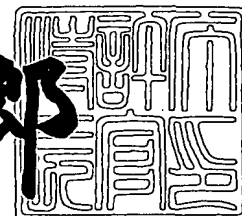
Applicant(s):

住友電気工業株式会社

2003年 1月24日

特 許 庁 長 官  
Commissioner,  
Japan Patent Office

太田 信一郎



出証番号 出証特2003-3001565

【書類名】 特許願

【整理番号】 102Y0381

【提出日】 平成14年 6月28日

【あて先】 特許庁長官殿

【国際特許分類】 H04J 14/02

【発明者】

【住所又は居所】 神奈川県横浜市栄区田谷町1番地 住友電気工業株式会  
社横浜製作所内

【氏名】 宮本 敏行

【発明者】

【住所又は居所】 神奈川県横浜市栄区田谷町1番地 住友電気工業株式会  
社横浜製作所内

【氏名】 重松 昌行

【発明者】

【住所又は居所】 神奈川県横浜市栄区田谷町1番地 住友電気工業株式会  
社横浜製作所内

【氏名】 西村 正幸

【特許出願人】

【識別番号】 000002130

【氏名又は名称】 住友電気工業株式会社

【代理人】

【識別番号】 100088155

【弁理士】

【氏名又は名称】 長谷川 芳樹

【選任した代理人】

【識別番号】 100089978

【弁理士】

【氏名又は名称】 塩田 辰也



【選任した代理人】

【識別番号】 100092657

【弁理士】

【氏名又は名称】 寺崎 史朗

【選任した代理人】

【識別番号】 100110582

【弁理士】

【氏名又は名称】 柴田 昌聰

【手数料の表示】

【予納台帳番号】 014708

【納付金額】 21,000円

【提出物件の目録】

【物件名】 明細書 1

【物件名】 図面 1

【物件名】 要約書 1

【包括委任状番号】 0106993

【ブルーフの要否】 要

【書類名】 明細書

【発明の名称】 光伝送システム

【特許請求の範囲】

【請求項 1】 光周波数間隔が  $400\text{ GHz}$  以上  $12.5\text{ THz}$  以下である多波長の信号光を光ファイバ伝送路により伝送するとともに、ラマン増幅用励起光により前記多波長の信号光をラマン増幅するラマン増幅手段を備えることを特徴とする光伝送システム。

【請求項 2】 前記多波長の信号光の波長間隔が  $10\text{ nm}$  以上であることを特徴とする請求項 1 記載の光伝送システム。

【請求項 3】 前記ラマン増幅手段が集中定数型のものであることを特徴とする請求項 1 記載の光伝送システム。

【請求項 4】 集中定数型の前記ラマン増幅手段が、前記ラマン増幅手段より出力される余剰のラマン増幅用励起光を、前記ラマン増幅手段に接続された光ファイバ伝送路に出力することを特徴とする請求項 3 記載の光伝送システム。

【請求項 5】 前記ラマン増幅手段が前記多波長の信号光の送信端および受信端の双方または何れか一方に設けられていることを特徴とする請求項 1 記載の光伝送システム。

【請求項 6】 前記ラマン増幅手段が、前記多波長の信号光を含む波長帯域で波長分散が負である光ファイバにおいて前記多波長の信号光をラマン増幅することを特徴とする請求項 1 記載の光伝送システム。

【請求項 7】 前記ラマン増幅手段が、波長  $1.39\text{ }\mu\text{m}$  付近における  $\text{OH}$  基に因る損失ピークが  $0.33\text{ dB/km}$  以下である光ファイバにおいて前記多波長の信号光をラマン増幅することを特徴とする請求項 1 記載の光伝送システム。

【請求項 8】 前記多波長の信号光のうちの隣接する信号光波長間に前記ラマン増幅用励起光の波長が存在することを特徴とする請求項 1 記載の光伝送システム。

【請求項 9】 前記ラマン増幅手段が、前記多波長の信号光のうち前記光ファイバ伝送路における伝送損失が第 1 閾値以上である波長範囲内の信号光をラマ

ン増幅することを特徴とする請求項 1 記載の光伝送システム。

【請求項 1 0】 前記多波長の信号光のうち前記光ファイバ伝送路における累積波長分散が第 2 閾値以上である波長範囲内の信号光の分散を補償する分散補償手段を更に備えることを特徴とする請求項 1 記載の光伝送システム。

【発明の詳細な説明】

【 0 0 0 1】

【発明の属する技術分野】

本発明は、多波長の信号光を伝送する光伝送システムに関するものである。

【 0 0 0 2】

【従来の技術】

波長分割多重 (WDM: Wavelength Division Multiplexing) 光伝送システムは、多波長の信号光を多重化した光ファイバ伝送路により伝送するものであり、大容量の情報を高速に送受信することができる。通信需要が旺盛な幹線系の光伝送システムでは、多波長の信号光の光周波数間隔を狭くすることで多重度を大きくして、これにより更なる大容量化を図ることが検討されている。このような多重度が大きい WDM は、DWDM (Dense WDM) と呼ばれる。

【 0 0 0 3】

一方、それほど通信需要が大きい光伝送システムでは、多波長の信号光の光周波数間隔を広くすることで多重度を小さくして、これによりシステムコストの低減が図られている。このような多重度が小さい WDM は、CWDM (Coarse WDM) と呼ばれる。CWDM 光伝送システムでは、信号光の波数の低減に伴って光部品 (例えば、信号光源、受光素子、等) の数を削減し、また、光周波数間隔が大きいことに因り波長精度要求値が低い安価な光部品 (例えば、光合波器、光分波器、等) を使用することで、システムコストの低減を図ることができる。

【 0 0 0 4】

【発明が解決しようとする課題】

しかし、CWDM 光伝送システムでは、光周波数間隔が大きいことから、多波長の信号光を含む信号光波長帯域の幅が広くなり、例えば、この帯域幅が 1 0 0

nm程度になる場合もある。帯域幅が100nm程度もあると、その信号光波長帯域内の短波長側と長波長側とでは、光ファイバ伝送路の光学特性（例えば、伝送損失、波長分散、等）が大きく異なる。このことから、CWDM光伝送システムは、信号光波長帯域内の多波長の信号光それぞれを高品質で伝送することが困難である。

## 【0005】

本発明は、上記問題点を解消する為になされたものであり、多波長の信号光それぞれを高品質で伝送することができる光伝送システムを提供することを目的とする。

## 【0006】

## 【課題を解決するための手段】

本発明に係る光伝送システムは、光周波数間隔が400GHz以上12.5THz以下である多波長の信号光を光ファイバ伝送路により伝送するとともに、ラマン増幅用励起光により多波長の信号光をラマン増幅するラマン増幅手段を備えることを特徴とする。また、多波長の信号光の波長間隔が10nm以上であるのが好適である。この光伝送システムは、多波長の信号光を多重化して光ファイバ伝送路により伝送するCWDM光伝送システムであって、ラマン増幅手段により多波長の信号光をラマン増幅することで、多波長の信号光それぞれを高品質で伝送することができる。

## 【0007】

本発明に係る光伝送システムは、ラマン増幅手段が集中定数型のものであるのが好適である。また、集中定数型のラマン増幅手段が、ラマン増幅手段より出力される余剰のラマン増幅用励起光を、ラマン増幅手段に接続された光ファイバ伝送路に出力するのが好適である。また、ラマン増幅手段が多波長の信号光の送信端および受信端の双方または何れか一方に設けられているのが好適である。これら何れの場合にも、多波長の信号光を高利得でラマン増幅することができる。

## 【0008】

本発明に係る光伝送システムは、ラマン増幅手段が、多波長の信号光を含む波長帯域で波長分散が負である光ファイバにおいて多波長の信号光をラマン増幅す

るのが好適である。この場合には、一般に光ファイバ伝送路が有する正の波長分散が、ラマン増幅手段に含まれる波長分散が負である光ファイバにより補償されるので、この点でも多波長の信号光それぞれを高品質で伝送することができる。

## 【 0 0 0 9 】

本発明に係る光伝送システムは、ラマン増幅手段が、波長  $1.39 \mu\text{m}$  付近における OH 基に因る損失ピークが  $0.33 \text{ dB/km}$  以下である光ファイバにおいて多波長の信号光をラマン増幅するのが好適である。この場合には、波長  $1.39 \mu\text{m}$  付近の波長の励起光を高効率に供給することができるので、励起効率を改善することができ、また、利得スペクトルも改善することができる。

## 【 0 0 1 0 】

本発明に係る光伝送システムは、多波長の信号光のうちの隣接する信号光波長間にラマン増幅用励起光の波長が存在するのが好適である。このように信号光波長と励起光波長とを配置することで、信号光波長帯域内の長波長側でも信号光を高利得でラマン増幅することができる。

## 【 0 0 1 1 】

本発明に係る光伝送システムは、ラマン増幅手段が、多波長の信号光のうち光ファイバ伝送路における伝送損失が第 1 閾値以上である波長範囲内の信号光をラマン増幅するのが好適である。また、多波長の信号光のうち光ファイバ伝送路における累積波長分散が第 2 閾値以上である波長範囲内の信号光の分散を補償する分散補償手段を更に備えるのが好適である。これら何れの場合にも、信号光波長帯域内の必要な波長範囲においてラマン増幅または分散補償することができるので、この点でも多波長の信号光それぞれを高品質で伝送することができる。

## 【 0 0 1 2 】

## 【発明の実施の形態】

以下、添付図面を参照して本発明の実施の形態を詳細に説明する。なお、図面の説明において同一の要素には同一の符号を付し、重複する説明を省略する。

## 【 0 0 1 3 】

## (第 1 実施形態)

先ず、本発明に係る光伝送システムの第 1 実施形態について説明する。図 1 は

、第1実施形態に係る光伝送システム1の構成図である。この図に示される光伝送システム1は、CWD M光伝送システムであって、光送信器110、光ファイバ伝送路120および集中定数型のラマン増幅器130を備える。

## 【0014】

光送信器110は、光周波数間隔が400GHz以上12.5THz以下である多波長の信号光を多重化して出力する。この光送信器110より出力される多波長の信号光の波長間隔が10nm以上であるのが好適である。光送信器110に含まれる各波長の信号光を出力する光源としては、例えば、分布帰還型レーザ光源、ファブリ・ペロー型の半導体レーザ光源(FP-LD)、および、このFP-LDと光ファイバグレーティングとを組み合わせる出力波長の安定化を図るファイバグレーティングレーザ光源、等の光源が好適に用いられ得る。信号光の変調に際しては、これらの光源が直接変調されてもよいし、外部変調器により外部変調されてもよい。また、これらの光源は温度調整されなくてもよい。CWD M光伝送では、各信号光の波長の変動の許容範囲が広いので、直接変調または無温調とすることにより信号光波長が少々変動しても構わない。

## 【0015】

光ファイバ伝送路120は、光送信器110より出力された多波長の信号光をラマン増幅器130へ向けて伝送する。この光ファイバ伝送路120は、波長1.3 $\mu$ m付近に零分散波長を有する標準的なシングルモード光ファイバ、波長1.3 $\mu$ mより長波長側に零分散波長を有し波長1.55 $\mu$ mにおいて小さい正の波長分散を有する非零分散シフト光ファイバ、波長1.55 $\mu$ m付近に零分散波長を有する零分散シフト光ファイバ、コア領域が実質的に純石英ガラスであってクラッド領域にF元素が添加されている純石英コア光ファイバ、および、実効断面積が通常のものより拡大されているシングルモード光ファイバ、等の何れの光ファイバからなるものであってもよい。また、光ファイバ伝送路120は、これらのうちの何れか2種以上のものが接続されてなるものであってもよいし、これらのうち何れか1種以上のものと分散補償光ファイバとが接続されてなるものであってもよい。

## 【0016】

ラマン増幅器130は、光ファイバ伝送路120により伝送されて到達した多波長の信号光を入力し、この多波長の信号光をラマン増幅して出力する。ラマン増幅器130は、多波長の信号光の送信端および受信端の双方または何れか一方に設けられているのが好適である。ラマン増幅器130は、信号光入力端から信号光出力端へ向かって順に、光アイソレータ131、光カップラ133、ラマン増幅用の光ファイバ137、光カップラ134および光アイソレータ132を備え、また、光カップラ133に接続された励起光源部135、および、光カップラ134に接続された励起光源部136を備える。

## 【0017】

光アイソレータ131、132それぞれは、信号光入力端から信号光出力端へ向かう順方向に光を通過させるが、逆方向には光を通過させない。励起光源部135、136それぞれは、光ファイバ137において信号光をラマン増幅する為の励起光を出力する。光カップラ133は、励起光源部135より出力されて到達した励起光を光ファイバ137へ順方向に出力するとともに、光アイソレータ131より出力されて到達した信号光をも光ファイバ137へ出力する。光カップラ134は、励起光源部136より出力されて到達した励起光を光ファイバ137へ逆方向に出力するとともに、光ファイバ137より出力されて到達した信号光を光アイソレータ132へ出力する。

## 【0018】

励起光源部135、136それぞれは、例えば、ファブリ・ペロー型の半導体レーザ光源（FP-LD）、このFP-LDと光ファイバグレーティングとを組み合わせ出力波長の安定化を図るファイバグレーティングレーザ光源、分布帰還型レーザ光源、および、ラマンレーザ光源、等の光源を含むのが好適である。また、励起光源部135、136それぞれは、それに含まれる光源が偏波依存性を有する場合に、光源より出力された励起光を偏波合成して出力する偏波合成器を含むのが好適であり、また、光源より出力された励起光を無偏光化するデポラライザを含むのも好適である。

## 【0019】

ラマン増幅用の光ファイバ137は、ラマン増幅用の励起光が供給されること

により多波長の信号光をラマン増幅する。この光ファイバ137が石英系のものである場合、励起光周波数は信号光周波数より13.2THz程度小さく、励起光波長は信号光波長より100nm程度短い。また、一般に石英系光ファイバは波長1.39 $\mu$ m付近においてOH基に因る損失ピークが0.40dB/km程度あるが、本実施形態で用いられる光ファイバ137は、波長1.39 $\mu$ m付近においてOH基に因る損失ピークが0.33dB/km以下であるのが好適である。この損失ピークが小さいことにより、波長1.39 $\mu$ m付近のラマン増幅用の励起光は、光ファイバ137を低損失で伝搬するので、ラマン増幅の利得が優れたものとなる。

## 【0020】

励起光の入力パワーを $P_p$ とし、ラマン増幅用の光ファイバの長さを $L$ とし、信号光波長での光ファイバの伝送損失を $\alpha_s$ とし、励起光波長での光ファイバの伝送損失を $\alpha_p$ とし、光ファイバのラマン利得係数を $g_R$ とし、光ファイバの実効断面積を $A_{eff}$ とすると、この光ファイバにおけるラマン増幅により得られるオンオフ利得 $G_{on-off}$ および正味の利得 $G_{net}$ それぞれは、

$$G_{on-off} = \exp(L_{eff} P_p g_R / A_{eff}) \quad \dots (1a)$$

$$G_{net} = \exp(L_{eff} P_p g_R / A_{eff} - \alpha_s L) \quad \dots (1b)$$

ただし、

$$L_{eff} = (1 - \exp(-\alpha_p L)) / \alpha_p \quad \dots (1c)$$

なる式で表される。 $L_{eff}$ は光ファイバの実効長を表す。

## 【0021】

この式から、損失 $\alpha_p$ を小さくすることで、利得を大きくすることができる。波長1.39 $\mu$ m付近の波長の励起光を用いる場合、OH基に因る損失ピークを低減することが効果的である。波長1.39 $\mu$ m付近におけるOH基に因る損失ピークを通常の0.40dB/kmから0.33dB/km以下まで低減することにより、光ファイバの実効長 $L_{eff}$ を2.50kmから3.03kmまで長くすることができるので、励起効率が2割程度向上する。

## 【0022】

また、ラマン増幅用の光ファイバ137は、光ファイバ伝送路120の波長分



散を補償することができるのが好適である。一般に光ファイバ伝送路として用いられる光ファイバは、標準的なシングルモード光ファイバまたは分散シフト光ファイバであって、信号光波長帯域内の波長  $1.55\ \mu\text{m}$  において正の波長分散を有する。また、一般に信号光源として用いられるレーザダイオードより直接変調されて出力される信号光は、正の波長分散を有する。そこで、ラマン増幅用の光ファイバ 137 は、波長  $1.55\ \mu\text{m}$  において負の波長分散を有するのが好適である。このようにすることにより、累積波長分散に因る信号光の波形劣化が低減され、高品質の信号光伝送が可能となる。なお、光ファイバ 137 とは別に、分散補償器を設けてもよい。

## 【0023】

図 2 は、信号光および励起光それぞれの波長の配置を説明する図である。同図 (a) に示される波長配置では、多波長の信号光を含む信号光波長帯域の幅が  $100\ \text{nm}$  以下であり、その帯域内に信号光（この図では 6 波長）が存在し、信号光波長帯域より短波長側に全ての励起光の波長が存在し、励起光の各波長が  $35\ \text{nm}$  以上はなれているのが好適である。同図 (b) に示される波長配置では、多波長の信号光を含む信号光波長帯域より短波長側に励起光の波長が存在するだけでなく、その信号光波長帯域であって隣接信号光波長間にも励起光の波長が存在する。このように隣接信号光波長間に励起光波長を配置することで、広帯域で信号光を高効率にラマン増幅することができ、また、信号光波長帯域内における利得スペクトルを所望のものとすることができる。同図 (c) に示される波長配置では、多波長の信号光を含む信号光波長帯域の幅が  $100\ \text{nm}$  以上である場合に、その信号光波長帯域より短波長側に全ての励起光の波長が存在する。このような場合でも、一般に信号光波長帯域内において伝送損失が小さい高波長側でラマン増幅しなくても（または、利得が小さくても）よいので、高品質の CWDM 光伝送が可能である。

## 【0024】

この光伝送システム 1 では、光周波数間隔が  $400\ \text{GHz}$  以上  $12.5\ \text{THz}$  以下である多波長の信号光は、光送信器 110 より出力され、光ファイバ伝送路 120 により伝送されて、ラマン増幅器 130 に入力する。ラマン増幅器 130

では、励起光源部 1 3 5, 1 3 6 より出力された励起光が光カプラ 1 3 3, 1 3 3 を経て光ファイバ 1 3 7 に供給される。ラマン増幅器 1 3 0 に入力した多波長の信号光は、光アイソレータ 1 3 1 および光カプラ 1 3 3 を経て光ファイバ 1 3 7 に入力し、この光ファイバ 1 3 7 においてラマン増幅される。そして、このラマン増幅された多波長の信号光は、光カプラ 1 3 4 および光アイソレータ 1 3 2 を経て、ラマン増幅器 1 3 0 より出力される。ラマン増幅器 1 3 0 における利得スペクトルの帯域幅や形状は比較的自由に設計することができるので、信号光波長帯域が広帯域であっても、多波長の信号光それぞれを高品質で C W D M 光伝送することができる。

## 【 0 0 2 5 】

## (第 2 実施形態)

次に、本発明に係る光伝送システムの第 2 実施形態について説明する。図 3 は、第 2 実施形態に係る光伝送システム 2 の構成図である。この図に示される光伝送システム 2 は、C W D M 光伝送システムであって、光送信器 1 1 0、光ファイバ伝送路 1 2 0 および集中定数型のラマン増幅器 2 3 0 を備える。第 2 実施形態に係る光伝送システム 2 は、前述の第 1 実施形態に係る光伝送システム 1 と比較すると、ラマン増幅器 1 3 0 に替えてラマン増幅器 2 3 0 を備えている点で相違する。

## 【 0 0 2 6 】

本実施形態におけるラマン増幅器 2 3 0 は、信号光入力端から信号光出力端へ向かって順に、ラマン増幅用の光ファイバ 1 3 7、光カプラ 1 3 4 および光アイソレータ 1 3 2 を備え、また、光カプラ 1 3 4 に接続された励起光源部 1 3 6 を備える。このラマン増幅器 2 3 0 は、第 1 実施形態におけるラマン増幅器 1 3 0 から、光アイソレータ 1 3 1、光カプラ 1 3 3 および励起光源部 1 3 5 を取り除いたものである。

## 【 0 0 2 7 】

この光伝送システム 2 では、ラマン増幅器 2 3 0 内の励起光源部 1 3 6 より出力された励起光が光カプラ 4 を経て光ファイバ 1 3 7 へ供給されるだけでなく、余剰の励起光がラマン増幅器 2 3 0 より光ファイバ伝送路 1 2 0 へ供給される。

すなわち、光ファイバ伝送路 1 2 0、光カプラ 1 3 4 および励起光源部 1 3 6 は、分布定数型のラマン増幅器を構成している。したがって、光送信器 1 1 0 より出力された多波長の信号光は、光ファイバ伝送路 1 2 0 により伝送される間にもラマン増幅され、また、ラマン増幅器 2 3 0 によってもラマン増幅される。

## 【 0 0 2 8 】

なお、本実施形態では、光ファイバ伝送路 1 2 0 にも励起光が供給されるので、光ファイバ 1 3 7 だけでなく光ファイバ伝送路 1 2 0 も、波長 1. 3 9  $\mu$  m 付近において O H 基に因る損失ピークが 0. 3 3 d B / k m 以下であるのが好適である。

## 【 0 0 2 9 】

## (第 3 実施形態)

次に、本発明に係る光伝送システムの第 3 実施形態について説明する。図 4 は、第 3 実施形態に係る光伝送システム 3 の構成図である。この図に示される光伝送システム 3 は、C W D M 光伝送システムであって、光送信器 1 1 0、光ファイバ伝送路 1 2 0、光受信器 1 4 0、光アイソレータ 1 3 1、1 3 2、光カプラ 1 3 3、1 3 4、および、励起光源部 1 3 5、1 3 6 を備える。光ファイバ伝送路 1 2 0 は、光送信器 1 1 0 と光受信器 1 4 0 との間に敷設されている。光アイソレータ 1 3 1、光カプラ 1 3 3 および励起光源部 1 3 5 は、光ファイバ伝送路 1 2 0 の光送信器 1 1 0 側に設けられている。また、光アイソレータ 1 3 2、光カプラ 1 3 4 および励起光源部 1 3 6 は、光ファイバ伝送路 1 2 0 の光受信器 1 4 0 側に設けられている。

## 【 0 0 3 0 】

本実施形態では、励起光源部 1 3 5 より出力された励起光は、光カプラ 1 3 3 を経て光ファイバ伝送路 1 2 0 へ順方向に供給される。また、励起光源部 1 3 6 より出力された励起光は、光カプラ 1 3 4 を経て光ファイバ伝送路 1 2 0 へ逆方向に供給される。すなわち、光ファイバ伝送路 1 2 0、光カプラ 1 3 3、1 3 4、および、励起光源部 1 3 5、1 3 6 は、分布定数型のラマン増幅器を構成している。したがって、光送信器 1 1 0 より出力された多波長の信号光は、光ファイバ伝送路 1 2 0 により伝送される間にラマン増幅され、光受信器 1 4 0 に到達し

て受信される。

#### 【0031】

なお、本実施形態では、光ファイバ伝送路120に励起光が供給されるので、光ファイバ伝送路120は、波長 $1.39\mu\text{m}$ 付近においてOH基に因る損失ピークが $0.33\text{dB/km}$ 以下であるのが好適である。

#### 【0032】

##### (第4実施形態)

次に、本発明に係る光伝送システムの第4実施形態について説明する。図5は、第4実施形態に係る光伝送システム4の構成図である。この図に示される光伝送システム4は、CWDM光伝送システムであって、信号光源部 $111_1\sim 111_4$ 、光合波器112、光ファイバ伝送路120、光分波器142、分散補償器143、光分波器 $144_1, 144_2$ 、受光部 $141_1\sim 141_4$ 、光カプラ133, 134、および、励起光源部135, 136を備える。

#### 【0033】

信号光源部 $111_1\sim 111_4$ それぞれは、互いに異なる波長の信号光を出力する。光合波器112は、信号光源部 $111_1\sim 111_4$ それぞれより出力された信号光を合波して出力する。信号光源部 $111_1\sim 111_4$ および光合波器112は光送信器を構成している。光合波器112より出力される多波長の信号光は、光周波数間隔が $400\text{GHz}$ 以上 $12.5\text{THz}$ 以下であり、波長間隔が $10\text{nm}$ 以上であるのが好適である。

#### 【0034】

光ファイバ伝送路120は、光合波器112と光分波器142との間に敷設されている。光カプラ133および励起光源部135は、光ファイバ伝送路120の光合波器112側に設けられている。また、光カプラ134および励起光源部136は、光ファイバ伝送路120の光分波器142側に設けられている。励起光源部135より出力された励起光は、光カプラ133を経て光ファイバ伝送路120へ順方向に供給される。また、励起光源部136より出力された励起光は、光カプラ134を経て光ファイバ伝送路120へ逆方向に供給される。

#### 【0035】

すなわち、光ファイバ伝送路 1 2 0、光カプラ 1 3 3、1 3 4、および、励起光源部 1 3 5、1 3 6 は、分布定数型のラマン増幅器を構成している。したがって、光合波器 1 1 2 より出力された多波長の信号光は、光ファイバ伝送路 1 2 0 により伝送される間にラマン増幅され、光分波器 1 4 2 に到達する。なお、本実施形態では、光ファイバ伝送路 1 2 0 に励起光が供給されるので、光ファイバ伝送路 1 2 0 は、波長  $1.39 \mu\text{m}$  付近において OH 基に因る損失ピークが  $0.33 \text{ dB/km}$  以下であるのが好適である

## 【0036】

光分波器 1 4 2 は、光ファイバ伝送路 1 2 0 により伝送されて到達した多波長の信号光を入力し、この多波長の信号光を第 1 波長域と第 2 波長域とに分波して、第 1 波長域の信号光を光分波器 1 4 4<sub>1</sub> へ出力し、第 2 波長域の信号光を分散補償器 1 4 3 へ出力する。分散補償器 1 4 3 は、光分波器 1 4 2 より到達した第 2 波長域の信号光を入力して、この信号光の波長分散を補償して光分波器 1 4 4<sub>2</sub> へ出力する。分散補償器 1 4 3 として、信号光波長帯域において波長分散が負である分散補償光ファイバが好適に用いられる。光分波器 1 4 4<sub>1</sub> は、光分波器 1 4 2 より到達した第 1 波長域の信号光を入力して波長毎に分波する。また、光分波器 1 4 4<sub>2</sub> は、分散補償器 1 4 3 より到達した第 2 波長域の信号光を入力して波長毎に分波する。そして、受光部 1 4 1<sub>1</sub> ~ 1 4 1<sub>4</sub> それぞれは、光分波器 1 4 4<sub>1</sub>、1 4 4<sub>2</sub> により分波された各波長の信号光を入力して受信する。

## 【0037】

光分波器 1 4 4<sub>1</sub>、1 4 4<sub>2</sub> には、誘電体多層膜フィルタやファイバカプラ型のフィルタを用いるのが好ましく、コスト低減の観点からは、隣接チャネル間でのガードバンドが  $5 \text{ nm}$  以上である安価なフィルタを使用するのが好ましい。

## 【0038】

図 6 は、光ファイバ伝送路の伝送損失および波長分散それぞれの波長依存性を示す図である。この図に示されるように、波長  $1400 \sim 1500 \text{ nm}$  程度の信号光波長帯域内では、光ファイバ伝送路は、高波長側で累積波長分散の絶対値が大きく、短波長側で伝送損失が大きい。そこで、本実施形態では、光ファイバ伝送路 1 2 0 の累積波長分散が大きい高波長側の信号光の波長分散を補償する。ま

た、光ファイバ伝送路 1 2 0 の伝送損失が大きい短波長側の信号光を、高波長側より大きい利得でラマン増幅する。

## 【 0 0 3 9 】

すなわち、本実施形態では、励起光源 1 3 5, 1 3 6 より光ファイバ伝送路 1 2 0 に供給されるラマン増幅用の励起光の波長およびパワーが適切に設定されることにより、多波長の信号光のうち光ファイバ伝送路 1 2 0 における伝送損失が第 1 閾値以上である波長範囲内の信号光が高利得でラマン増幅される。このとき、その他の波長の信号光もラマン増幅されてもよい。なお、第 1 閾値はシステム毎に適切に設定される。

## 【 0 0 4 0 】

また、適切な分波特性を有する光分波器 1 4 2 を用いることにより、多波長の信号光のうち光ファイバ伝送路 1 2 0 における累積波長分散が第 2 閾値以上である波長範囲内の信号光の分散が分散補償器 1 4 3 により補償される。このとき、その他の波長の信号光は、更なる損失を回避するために、分散補償を行わないのが好ましい。なお、第 2 閾値もシステム毎に適切に設定される。

## 【 0 0 4 1 】

このように、本実施形態に係る光伝送システム 4 は、第 1 ～第 3 実施形態それぞれの光伝送システムが奏する効果に加えて、以下のような効果をも奏することができる。すなわち、信号光波長帯域のうち光ファイバ伝送路の伝送損失が大きい短波長側の信号光を高利得でラマン増幅し、或いは、信号光波長帯域のうち光ファイバ伝送路の累積波長分散が大きい長波長側の信号光を分散補償することで、信号光波長帯域が広帯域であっても、多波長の信号光それぞれを高品質で C W D M 光伝送することができる。

## 【 0 0 4 2 】

## (実施例)

次に、第 3 実施形態に係る光伝送システム 3 の実施例について説明する。ここでは、光ファイバ伝送路 1 2 0 は、長さを 8 0 k m とし、標準的なシングルモード光ファイバ ( S M F )、分散シフト光ファイバ ( D S F )、および、非零分散シフト光ファイバ ( N Z - D S F ) の何れかとした。光送信器 1 1 0 より出力さ

れる多波長の信号光は、波長帯域 1 5 1 0 ~ 1 6 1 0 n m の範囲内の 2 0 n m 間隔の 6 波とした。光ファイバ伝送路 1 2 0 におけるラマン増幅の正味の利得  $G_{ne}$  が - 1 7 d B となるように、励起光源部 1 3 5, 1 3 6 より出力される励起光の波長およびパワーを設定した。励起光波長数は 2 または 3 とした。励起光波長数が 2 の場合、励起光波長は 1 4 2 0 n m および 1 4 9 0 n m とした。励起光波長数が 3 の場合、励起光波長は 1 4 2 0 n m, 1 4 6 n m および 1 4 9 0 n m とした。光アイソレータ 1 3 1, 1 3 2 それぞれの挿入損失を 0. 6 d B とした。

## 【 0 0 4 3 】

波長 1 5 5 0 n m における伝送損失は、シングルモード光ファイバでは 0. 1 9 5 d B / k m であり、分散シフト光ファイバでは 0. 2 1 0 d B / k m であり、非零分散シフト光ファイバでは 0. 2 0 0 d B / k m であった。非零分散シフト光ファイバの波長 1 3 8 0 n m における伝送損失は 0. 3 2 d B / k m であった。ラマン増幅の効率を示す  $FOM-r (= g_R / A_{eff})$  は、シングルモード光ファイバでは 0. 3 7 / W / k m であり、分散シフト光ファイバでは 0. 8 7 / W / k m であり、非零分散シフト光ファイバでは 0. 6 7 / W / k m であった。

## 【 0 0 4 4 】

図 7 ~ 図 9 それぞれは、実施例の光伝送システムにおける利得スペクトルを示す図である。図 7 は、光ファイバ伝送路 1 2 0 として標準的なシングルモード光ファイバを用いた場合の利得スペクトルを示す。図 8 は、光ファイバ伝送路 1 2 0 として分散シフト光ファイバを用いた場合の利得スペクトルを示す。図 9 は、光ファイバ伝送路 1 2 0 として非零分散シフト光ファイバを用いた場合の利得スペクトルを示す。また、これらの図には、励起光波長数が 2 および 3 それぞれの場合だけでなく、ラマン増幅を行わない場合についても示されている。図 1 0 は、各実施例の光伝送システムにおける励起光パワーを示す図である。

## 【 0 0 4 5 】

これらの図から判るように、光ファイバ伝送路 1 2 0 として何れの種類の光ファイバを用いた場合にも、励起光波数が 2 であっても良好な利得スペクトルが得られ、また、励起光波数が 3 であれば更に良好な利得スペクトルが得られた。増幅される出力信号光のレベル差は 3 d B 以下であり、この点でも良好な結果が得

られた。OH基に因る吸収損失が小さい非零分散シフト光ファイバを用いた場合に、短波長側の励起光の所要パワーは小さかった。

【0046】

【発明の効果】

以上、詳細に説明したとおり、本発明に係る光伝送システムは、光周波数間隔が400GHz以上12.5THz以下である多波長の信号光を光ファイバ伝送路により伝送するとともに、ラマン増幅用励起光により多波長の信号光をラマン増幅するラマン増幅手段を備えることを特徴とする。この光伝送システムは、多波長の信号光を多重化して光ファイバ伝送路により伝送するCWDM光伝送システムであって、ラマン増幅手段により多波長の信号光をラマン増幅することで、多波長の信号光それぞれを高品質で伝送することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】

第1実施形態に係る光伝送システム1の構成図である。

【図2】

信号光および励起光それぞれの波長の配置を説明する図である。

【図3】

第2実施形態に係る光伝送システム2の構成図である。

【図4】

第3実施形態に係る光伝送システム3の構成図である。

【図5】

第4実施形態に係る光伝送システム4の構成図である。

【図6】

光ファイバ伝送路の伝送損失および波長分散それぞれの波長依存性を示す図である。

【図7】

実施例の光伝送システムにおける利得スペクトルを示す図である。

【図8】

実施例の光伝送システムにおける利得スペクトルを示す図である。



【図 9】

実施例の光伝送システムにおける利得スペクトルを示す図である。

【図 1 0】

各実施例の光伝送システムにおける励起光パワーを示す図である。

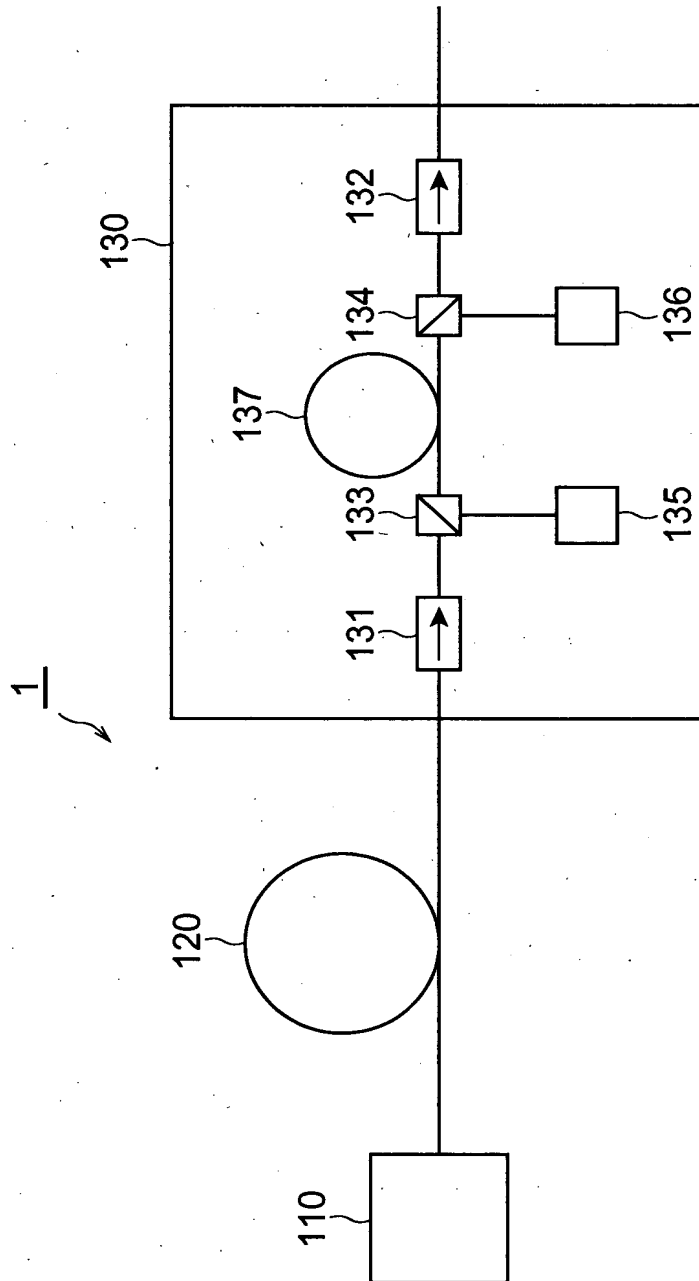
【符号の説明】

1 ～ 4 … 光伝送システム、 1 1 0 … 光送信器、 1 1 1 … 信号光源、 1 1 2 … 光合波器、 1 2 0 … 光ファイバ伝送路、 1 3 0 … ラマン増幅器、 1 3 1, 1 3 2 … 光アイソレータ、 1 3 3, 1 3 4 … 光カプラ、 1 3 5, 1 3 6 … 励起光源部、 1 3 7 … ラマン増幅用光ファイバ、 1 4 0 … 光受信器、 1 4 1 … 受光部、 1 4 2 … 光分波器、 1 4 3 … 分散補償器、 1 4 4 … 光分波器、 2 3 0 … ラマン増幅器。

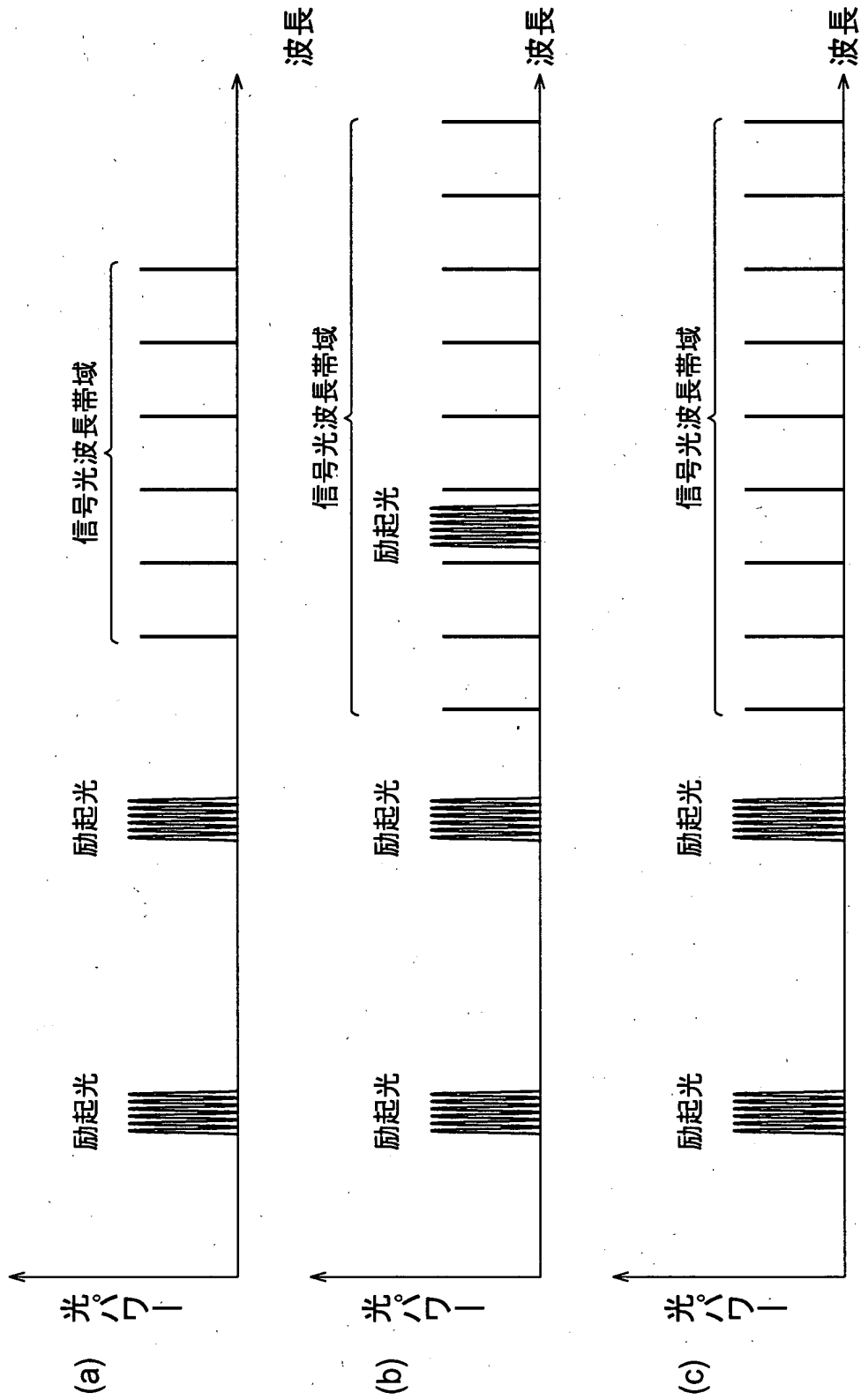
【書類名】

図面

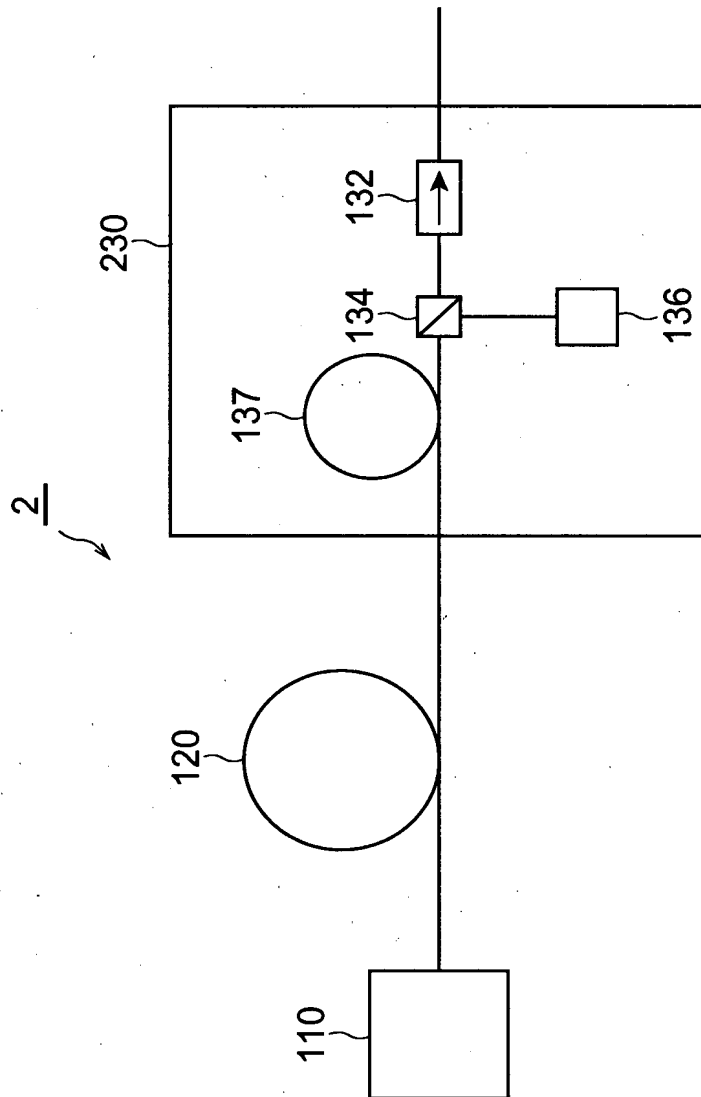
【図 1】



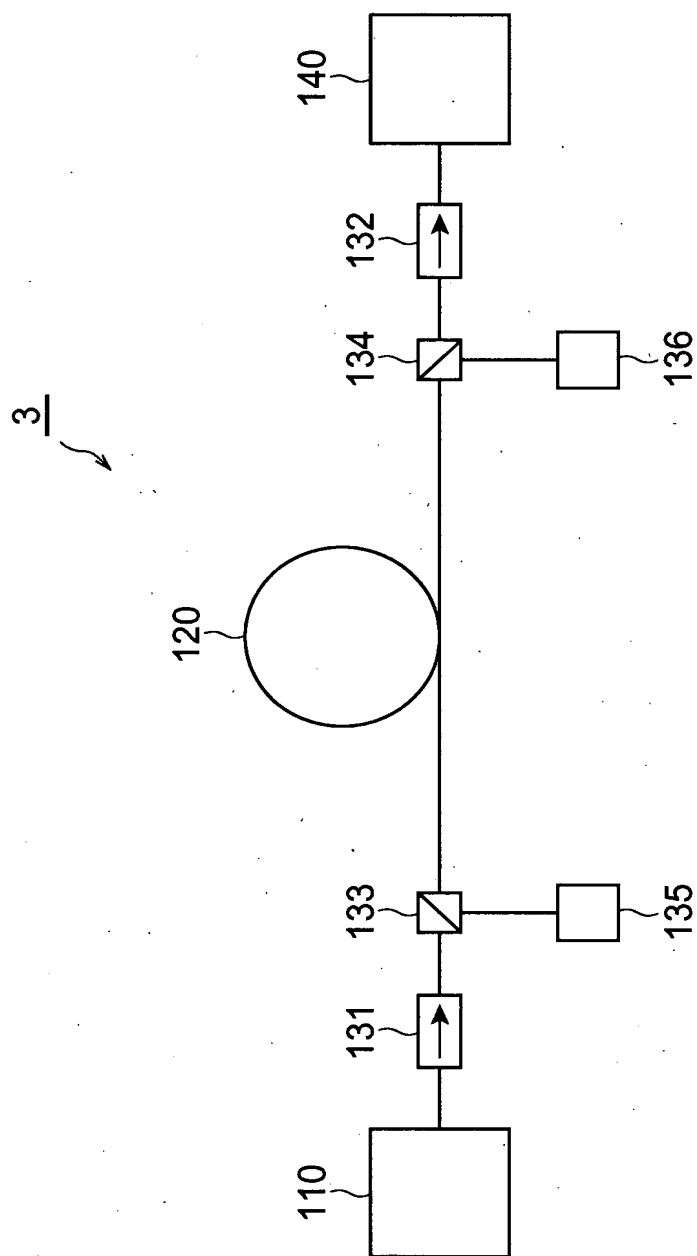
【図 2】



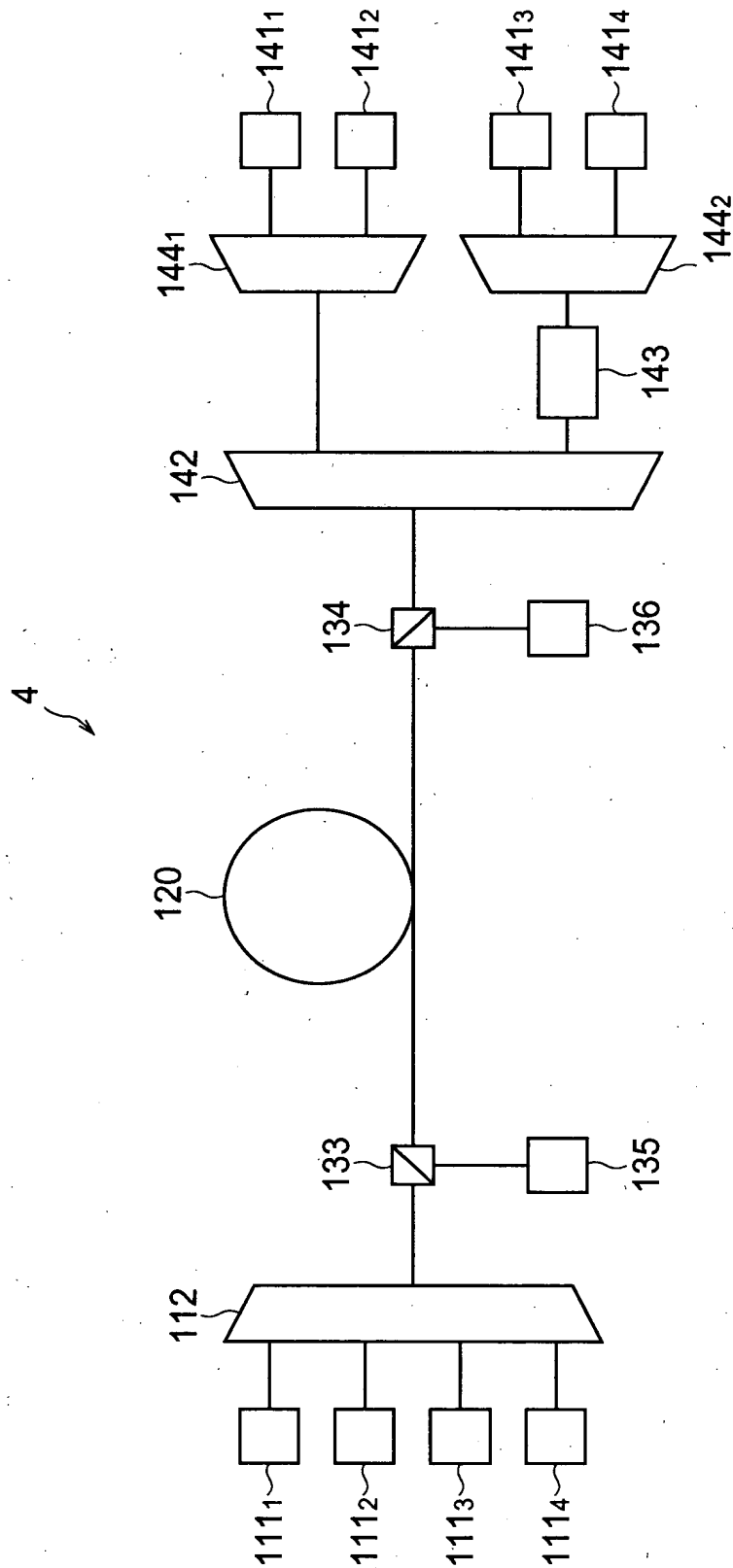
【図 3】



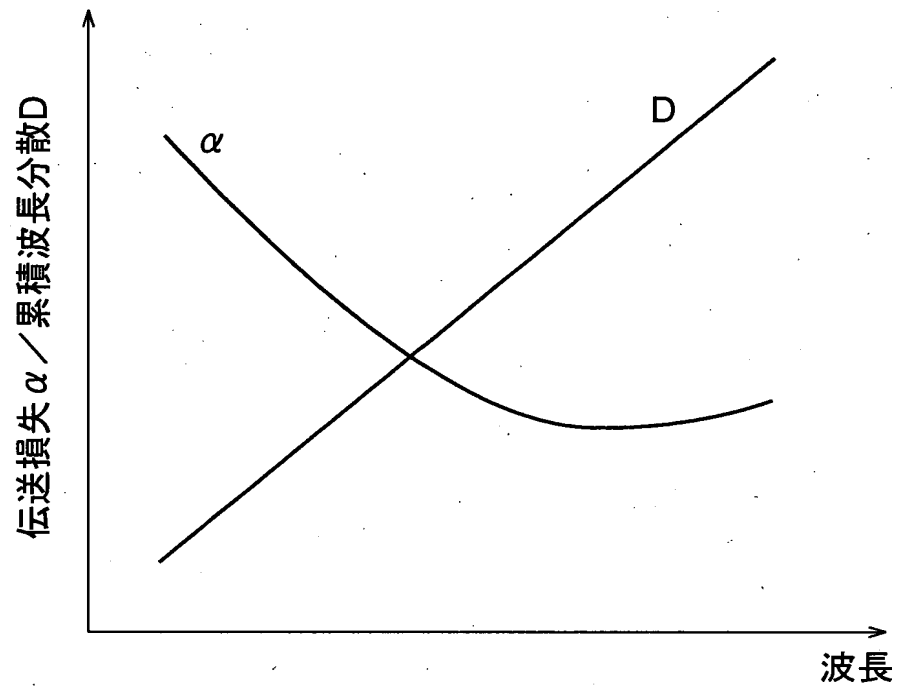
【図 4】



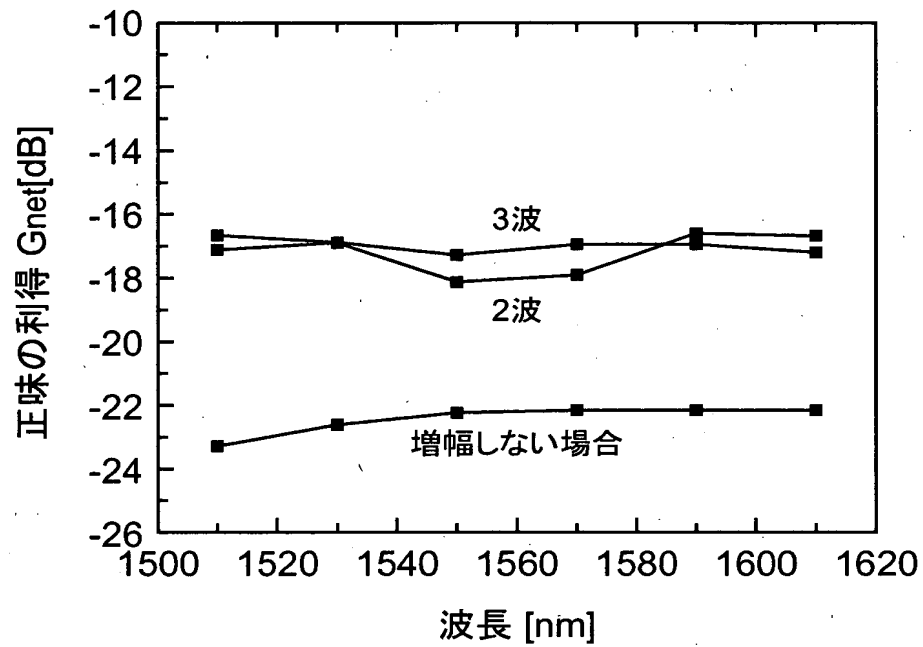
【図5】



【図6】

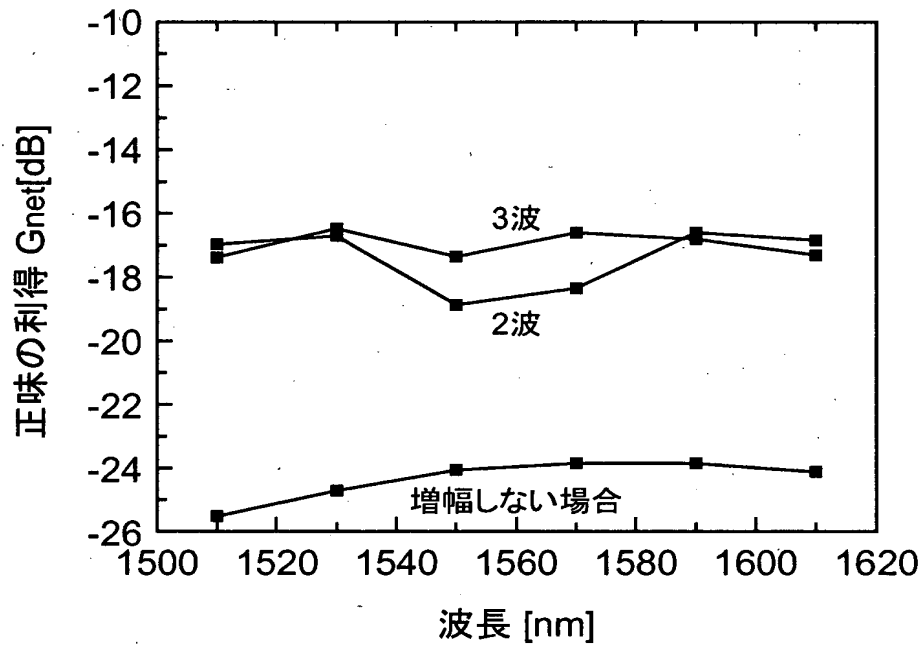


【図 7】

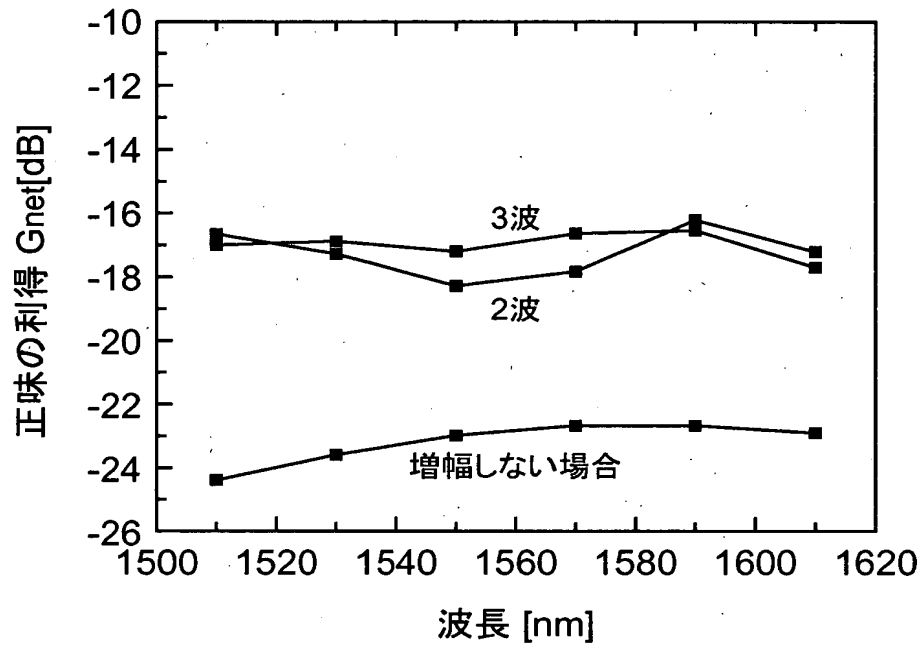




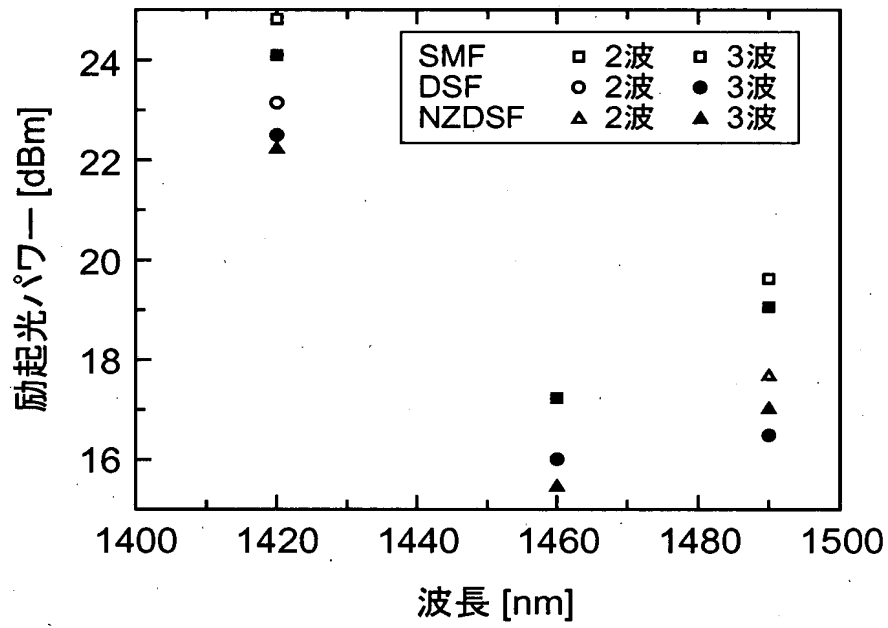
【図 8】



【図 9】



【図 1 0】



【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 多波長の信号光それぞれを高品質で伝送することができる光伝送システムを提供する。

【解決手段】 光伝送システム1では、光周波数間隔が400GHz以上12.5THz以下である多波長の信号光は、光送信器110より出力され、光ファイバ伝送路120により伝送されて、ラマン増幅器130に入力する。ラマン増幅器130では、励起光源部135、136より出力された励起光が光カップラ133、133を経て光ファイバ137に供給される。ラマン増幅器130に入力した多波長の信号光は、光アイソレータ131および光カップラ133を経て光ファイバ137に入力し、この光ファイバ137においてラマン増幅される。このラマン増幅された多波長の信号光は、光カップラ134および光アイソレータ132を経て、ラマン増幅器130より出力される。

【選択図】 図1